



Escola Tècnica Superior d'Enginyers  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

### Títol

**OPTIMIZACIÓN DE LAS OPERACIONES EN LA CAMPA  
DE LAS TERMINALES PORTUARIAS DE VEHÍCULOS**  
(722-TES-CA-4699)

### Autor/a

**Daniel Enciso Fargas**

### Tutor/a

**Sergi Saurí Marchan**

### Departament

**Infraestructura del Transport i del Territori**

### Intensificació

**Transports**

### Data

**22 d'octubre de 2010**

# Optimización de las operaciones en la campa de las terminales portuarias de vehículos

**Daniel Enciso Fargas**

Autor de la tesina

**Sergi Saurí Marchan**

Tutor de la tesina

Las nuevas estrategias de comercialización de los vehículos en el mercado mundial pasan por albergar importantes cantidades de vehículos en las terminales portuarias. Este almacenamiento de vehículos durante un tiempo indeterminado, se traduce en importantes problemas de espacio en las instalaciones existentes, hecho que conlleva a la congestión de las terminales. Es por esto, que se precisa de una mejora de la operatividad de la terminal, a través de proponer varias localizaciones para los vehículos recién llegados al puerto, así como el aumento de la productividad de las tareas allí realizadas.

Las terminales portuarias de vehículos son uno de los puntos de unión de la cadena logística, creada por grandes operadores internacionales, en las que se produce la conexión entre el transporte marítimo y el terrestre (camiones y ferrocarril). Estos operadores logísticos tienen como principal objetivo la reducción de los costes de explotación de estas terminales, a la vez de ofrecer un satisfactorio servicio a sus clientes (productores y consumidores)

Dentro de una terminal de vehículos existen múltiples tareas a realizar, la mayoría de las cuales están relacionadas con el movimiento de vehículos entre las distintas zonas de la misma. El presente estudio se centra en estudiar los movimientos de vehículos que se producen en la campa de almacenaje de la terminal durante el proceso de importación. Estos movimientos se resumen en la incorporación de los vehículos desde el muelle de descarga y la recolocación de los vehículos dentro de la campa.

La tarea de incorporación de vehículos supone una importante carga de trabajo para los conductores contratados en la terminal. En este sentido, este estudio pretende aportar estrategias de localización de los vehículos que reduzcan este tiempo de conducción por el interior de la campa, dadas unas restricciones de espacio predeterminadas. Asimismo, las tareas de recolocación de vehículos son un símbolo de ineficiencia para una terminal, al ser horas de trabajo no cobradas a los clientes y al incrementar el ratio de desperfectos en los vehículos al realizar mayor número de movimientos por el interior de la terminal.

Con la modelización de la localización de vehículos en el interior de la campa de almacenaje y la evaluación temporal de la terminal, atendiendo a varios ritmos operacionales de llegada y salida de vehículos, se obtienen unas relaciones entre los parámetros considerados anteriormente que ayudarán a los operadores logísticos a tomar las decisiones más acertadas para evitar las ineficiencias que se producen en sus terminales de vehículos.

# Optimization of operations in storage areas of a seaport vehicle terminal

**Daniel Enciso Fargas**

Author of the thesis

**Sergi Saurí Marchan**

Tutor of the thesis

The last vehicle marketing strategies in the world market tend to store a huge quantity of vehicles in seaport terminals. This vehicle storage causes several space problems in the existing facilities in ports around the globe. Also, these space problems can cause severe problems of congestion at terminals. For this reason, an improvement of tasks must be achieved to reduce the inefficiency of the system.

Seaport vehicle terminals are one of the junctions in the logistic chain of import vehicles. This market is controlled by a few big logistic service providers and one of the main goals they achieve is to reduce operating costs of the terminals. Moreover, the interaction between these logistic service providers and its clients (manufacturers and consumers) has to be taken into account by offering a reliable service.

In a vehicle terminal there are lots of different tasks that operators have to execute. Transportation, transshipment and storage of the vehicles are the main ones, and all three are related to vehicle movements between different parts of the terminal. The purpose of this dissertation is to study these vehicle movements produced in the import process. There are two types of different movements that are going to be treated. The first types of movements are related to the transportation of vehicles from the incoming buffer to the storage import terminal. The second types of movements are the relocations of vehicles done inside the storage locations.

The storage operations suppose an important workload for the hired drivers in a terminal. For this reason, this dissertation will propose several allocation strategies to minimize the sum of working hours for the driving personnel inside the storage location given some predetermined space restrictions. Furthermore, the vehicle relocation tasks are inefficient because they are not paid by costumers and also for the increase of damage ratio in vehicles due to excessive movements around the storage location.

The evaluation of these allocation strategies and the design of different scenarios (ship arrivals and vehicle departures) from the terminal will achieve the main goal of quantifying the cost surcharge of these inefficient activities in the terminal. Also, the logistic service providers will be given different tools to determine the actual situation of their storage locations that will help them anticipate inefficiencies in the relocation tasks that will have to be done.

## **AGRADECIMIENTOS**

La realización de esta tesina ha supuesto un importante paso de maduración en mi camino hacia la finalización de la carrera. Este camino ha estado lleno de alegrías y contratiempos que me han ayudado a evolucionar como persona. Por ello quiero agradecer a la gente que en cualquier momento a lo largo de estos años ha prestado su colaboración por pequeña que haya sido.

Primeramente, agradecer la inestimable colaboración de mi tutor de tesina, Sergi Saurí Marchan, Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos y Economista, que sin sus valiosas ideas y colaboración no hubiera sido posible finalizar este estudio. También agradecer la ayuda mostrada por su colaborador, Enrique Martín Alcalde, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, que desde el CENIT me ha ayudado a poder culminarla con éxito, así como a todos mis compañeros y amigos que con sus ánimos han estado siempre presentes.

Por último, agradecer el apoyo incondicional mostrado por toda mi familia, en especial a mis padres, que han estado siempre a mi lado a lo largo de todos estos años. Infinitamente agradecido.



## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Presentación.....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Enfoque metodológico.....	4
1.4 Estructura.....	5
 <b>CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DE UNA TERMINAL PORTUARIA           DE VEHÍCULOS.....</b>	 <b>6</b>
2.1 Introducción.....	7
2.2 La necesidad de una terminal de vehículos.....	7
2.3 La terminal portuaria de vehículos como sistema.....	9
Subsistema de carga / descarga.....	12
Subsistema de almacenaje.....	14
Subsistema de recepción / entrega.....	15
Subsistemas de interconexión.....	15
 <b>CAPÍTULO 3: ESTADO DEL ARTE.....</b>	 <b>16</b>
3.1 Introducción.....	17
3.2 Optimización de operaciones en terminales de contenedores.....	17
3.3 Optimización de operaciones en terminales de vehículos.....	19
3.4 Escenario actual en las terminales de vehículos.....	22



<b>CAPÍTULO 4: EL PROCESO DE IMPORTACIÓN.....</b>	<b>23</b>
4.1 Introducción.....	24
4.2 Descripción de las operaciones.....	24
Subsistema de descarga.....	26
Subsistema de interconexión descarga – almacenaje.....	28
Subsistema de almacenaje.....	30
Subsistema de interconexión almacenaje – entrega.....	35
Subsistema de entrega.....	37
 <b>CAPÍTULO 5: MODELIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE VEHÍCULOS.....</b>	 <b>39</b>
5.1 Introducción.....	40
5.2 Consideraciones previas a la modelización.....	40
5.3 Diseño en planta de las celdas de aparcamiento.....	41
5.4 Diseño en planta de los bloque de aparcamiento.....	43
5.5 Parámetros valorados en la modelización.....	44
Capacidad de la campa de almacenaje.....	44
Tiempo de acceso al aparcamiento.....	45
Productividad de la mano de obra.....	45
Estudio de las remociones.....	47
 <b>CAPÍTULO 6: METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA</b>	
<b>MODELIZACIÓN.....</b>	<b>53</b>
6.1 Introducción.....	54
6.2 Particularidades de la evaluación.....	54
Diseño de las configuraciones de localización.....	54
Diseño de los ritmos operacionales.....	64



<b>CAPÍTULO 7: EVALUACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE LOCALIZACIÓN.....</b>	<b>66</b>
7.1 Introducción.....	67
7.2 Capacidad de la campa de almacenaje.....	67
7.3 Tiempo de acceso a la aparcamiento.....	70
7.4 Productividad de la mano de obra.....	72
7.5 Estudio de las remociones.....	75
Remociones internas.....	75
Remociones externas.....	78
Análisis de sensibilidad.....	80
Análisis comparativo de estrategias de localización.....	90
<b>CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES.....</b>	<b>92</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>97</b>
<b>CAPÍTULO 10: ANEJOS.....</b>	<b>I</b>
<b>ANEJO I: SIMULACIONES DE LA MODELIZACIÓN DE LOS RITMOS OPERACIONALES.....</b>	<b>II</b>



## LISTA DE FIGURAS

**Figura 2.1** - Producción de automóviles en millones por países entre 1950 y 2008 (Fuente: OICA, Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles)

**Figura 2.2** - LCTC Obreron del operador Wallenius Wilhelmsen (Fuente: Wallenius Wilhelmsen)

**Figura 2.3** - Detalle en planta de un atraque Ro-Ro doble en una esquina de muelle con rampas al 10%.

**Figura 2.4** - Esquema de los tres subsistemas principales unidos entre ellos por los subsistemas de interconexión

**Figura 3.1** – Esquema de localización de las partes de una terminal de vehículos, divididas en localizaciones internas y externas, conectadas por varias vías de comunicación (Mattfeld y Kopfer, 2003)

**Figura 3.2** – Esquema de los subproblemas de planificación (*top-level* y *base-level anticipatory*) y programación (*base-level*) para el cálculo de la necesidad de personal óptima  $P_k$  que será implementada en la terminal (Mattfeld y Kopfer, 2003)

**Figura 4.1** - Esquema del proceso de importación y las restricciones temporales impuestas

**Figura 4.2** - Esquema de procesos en el subsistema de descarga

**Figura 4.3** - Esquema del subsistema de interconexión

**Figura 4.4** - Esquema de la distribución en planta de la campa de almacenaje con los aparcamientos perpendiculares al muelle de descarga

**Figura 4.5** - Esquema de la distribución en planta de la campa de almacenaje con los aparcamientos paralelos al muelle de descarga

**Figura 4.6** - Esquema en planta de un bloque rectangular con dos celdas de vehículos en posición vertical (a) y con dos celdas giradas un ángulo  $\alpha'=70^\circ$  respecto a la horizontal. (Fuente: Mattfeld, 2006)

**Figura 4.7** - Esquema en planta de las estrategias de asignación de aparcamiento con recolocación de vehículos (1-1') y de entrega directa sin recolocación (3)

**Figura 4.8** - Matriculaciones mensuales en España durante el período Enero 2004 – Agosto 2010, marcando en círculos las épocas de mayor demanda. (Fuente: ANFAC)

**Figura 5.1** – Diseño en planta de una celda de aparcamiento

**Figura 5.2** – Diseño en planta de los bloques de aparcamiento formados por 9 celdas, con la celda auxiliar en la parte central del bloque. (a) Parámetro de forma de la celda  $\beta=n/4$ . (b) Parámetro de forma de la celda  $\beta=1$ .

**Figura 5.3** – Gráfico de la relación esperada entre capacidad de la campa y superficie utilizada

**Figura 5.4** – Esquema en planta de una celda de aparcamiento partida, con los elementos (z) de la mitad de las filas y las remociones (R) a realizar según su posición

**Figura 6.1** – Diseño en planta de celda con  $\beta=n/4$

**Figura 6.2** – Diseño en planta de celda con  $\beta=n/16$

**Figura 6.3** – Diseño en planta de celda con  $\beta=n/16$

**Figura 6.4** – Esquema en planta de la estrategia de aparcamiento en doble fila para la campa de almacenaje estandarizada





**Figura 6.5** – Estrategia de llenado de un bloque de aparcamiento en doble fila. La celda central será la primera a ser llenada y posteriormente se procederá al llenado del resto

**Figura 6.6** - Esquema en planta de la distribución de bloques para la estrategia de aparcamiento en cuatro filas en la campa de almacenaje capaz de albergar a 5.400 vehículos

**Figura 6.7**– Estrategia de remociones externas propuesta para la estrategia de aparcamiento en cuatro filas, con la reconsolidación de los vehículos en la celda auxiliar central  $j=1$

**Figura 6.8** - Esquema en planta de la distribución de bloques y estrategia de aparcamiento en celda cuadrada para la campa de almacenaje

**Figura 6.9** – Estrategia de remociones externas propuesta para la estrategia de aparcamiento en celda cuadrada, con la reconsolidación de los vehículos en la celda central ( $j=1$ )

**Figura 7.1** – Resumen de las configuraciones en planta de los bloques de aparcamiento y la necesidad de espacio de cada una de las estrategias propuestas

**Figura 7.2** – Relación entre la capacidad de la campa de almacenaje y la superficie utilizada en el puerto

**Figura 7.3** – Relación entre los costes de explotación del suelo portuario y la capacidad de la campa de almacenaje

**Figura 7.4** – Gráfico que muestra el tiempo empleado para incorporar los vehículos en la campa de almacenaje según la estrategia de aparcamiento escogida

**Figura 7.5** – Posibilidades de aparcamiento en una celda de dos filas por parte de los conductores de una pandilla

**Figura 7.6** – Posibilidades de aparcamiento en una celda de cuatro filas por parte de los conductores de una pandilla

**Figura 7.7** – Posibilidades de aparcamiento en una celda cuadrada por parte de los conductores de una pandilla

**Figura 7.8** – Gráfico que relaciona el número esperado de remociones internas para cada celda de aparcamiento dependiendo del parámetro de forma escogido para el diseño

**Figura 7.9** – Gráfico que muestra el número de remociones internas a realizar en una campa de almacenamiento dependiendo de la capacidad y la configuración en planta escogida con  $\mu=3$  veh/día·celda

**Figura 7.10** – Gráfico que muestra la relación existente entre la capacidad y el coste asociado a las remociones internas

**Figura 7.11** – Gráfico del tiempo empleado en realizar las tareas de remoción externa según la estrategia utilizada

**Figura 7.12** – Gráfico de la evolución temporal de la ocupación de la campa y de los 6 bloques que la forman en un horizonte temporal de 90 días ( $\Delta t=1$  día,  $\mu=3$  veh/día·celda)

**Figura 7.13** – Gráfico de la evolución temporal de la ocupación de la campa y de los 6 bloques que la forman en un horizonte temporal de 90 días ( $\Delta t=1$  día,  $\mu=2$  veh/día·celda)

**Figura 7.14** – Gráfico de la evolución temporal de la ocupación de la campa y de los 6 bloques que la forman en un horizonte temporal de 90 días ( $\Delta t=0,6$  días,  $\mu=3$  veh/día·celda)

**Figura 7.15** – Planta de la campa de almacenaje con la estrategia 2 durante el proceso de llenado de los bloques (a) y después de haberse realizado la remoción externa en el primer bloque al cabo de 31 días de iniciar la simulación (b)

**Figura 7.16** – Gráfico de la evolución temporal de la ocupación de la campa y de los 6 bloques que la forman en un horizonte temporal de 90 días ( $\Delta t=0,6$  días,  $\mu=2$  veh/día·celda)



**Figura 7.17** – Gráfico de la evolución temporal de la ocupación de la campa y de los 6 bloques que la forman en un horizonte temporal de 90 días ( $\Delta t=2$  días,  $\mu=3$  veh/día-celda)

**Figura 7.18** – Gráfico de la evolución temporal de la ocupación de la campa y de los 6 bloques que la forman en un horizonte temporal de 90 días ( $\Delta t=2$  días,  $\mu=2$  veh/día-celda)

**Figura 7.19** – Relación entre el número de remociones externas realizadas en una campa por unidad de tiempo y el tiempo de realización  $t^*$  en días para los niveles operacionales considerados

**Figura 7.20** – Relación entre la ocupación máxima de una campa de almacenaje de 5.400 plazas disponibles y el tiempo de realización  $t^*$  en días para los niveles operacionales considerados

**Figura 7.21** – Relación entre el porcentaje de ocupación máxima de campa y bloque, y el número de remociones externas a realizar por unidad de tiempo (1 día)

**Figura 7.22** – Gráfico comparativo de la carga de trabajo de aparcamiento según se realicen o no remociones externas para cada una de las tres estrategias de aparcamiento propuestas



## LISTA DE TABLAS

**Tabla 6.1** – Valores de los tres ritmos de llegada de vehículos a la campa utilizados en la simulación

**Tabla 6.2** – Valores de los tres ritmos de salida de vehículos de la campa utilizados en la simulación

**Tabla 6.3** – Ritmos de llegadas y salidas de la campa utilizadas en el estudio de sensibilidad de las estrategias de aparcamiento propuestas

**Tabla 7.1** – Resumen de las distancias ( $D_i$ ) en metros y tiempos de acceso ( $t_i$ ) en segundos a cada bloque de aparcamiento ( $i=1,\dots,6$ )

**Tabla 7.2** – Resumen de resultados obtenidos con el análisis de sensibilidad 1

**Tabla 7.3** – Resumen de resultados obtenidos con el análisis de sensibilidad 2

**Tabla 7.4** – Resumen de resultados obtenidos con el análisis de sensibilidad 3

# **CAPÍTULO 1**

---

## **INTRODUCCIÓN**



## 1.1 PRESENTACIÓN

Una terminal portuaria de vehículos se trata de un sistema complejo y dinámico en el que se deben cubrir los servicios demandados por los productores de vehículos para la distribución de su mercancía, así como de los clientes que desean adquirirlos. El diseño, el control de las operaciones y la optimización de los procesos que se producen en dicha terminal conllevarán una mejora en el servicio prestado por el operador logístico de la terminal, que de bien seguro repercutirá en una reducción de los costes de explotación y demoras de recepción y entrega por parte de los actores implicados en el transporte de la mercancía hasta la terminal en el puerto.

El embarque y desembarque de vehículos en un puerto supone una de las actividades más significativas que se deben realizar en un puerto que disponga de una zona habilitada para hacer tal transferencia. Solamente el transporte de contenedores, granel sólido y líquido, y el de pasajeros pueden competir con tal actividad. La actual coyuntura económica ha supuesto la drástica reducción de los volúmenes de vehículos transferidos, debido a que la industria del automóvil ha sido una de las que más ha notado la recesión sufrida a nivel global.

Por esta razón, este es el momento idóneo para adoptar estrategias de innovación y mejora de las operaciones que se desarrollan en las terminales de vehículos y que repercutan de manera positiva en el desarrollo del sistema. Si bien es cierto que las limitaciones temporales y espaciales suponen un verdadero impedimento para el óptimo funcionamiento de las terminales, se deben proponer estrategias que consigan mejorar la mejora de la eficiencia de estas operaciones y que repercutan en un incremento de ingresos a los operadores logísticos que realizan las actividades de carga y descarga de los vehículos.

Centrando el análisis en la productividad de las operaciones portuarias, el tiempo de permanencia de un buque en el puerto muestra la eficiencia del operador logístico. En efecto, con la creciente capacidad de los buques transportadores de vehículos, el armador pretende aprovechar las economías de escala para conseguir disminuir los costes de transporte de los mismos. Es por esto, que las rutas deberán visitar mayor número de puertos para repartir los vehículos transportados, con lo que el tiempo de permanencia en puerto deberá ser el mínimo posible para repercutir en la reducción de dichos costes. Por consiguiente, el operador logístico debe garantizar que la carga o descarga se realice con una productividad máxima, así como con unas condiciones de seguridad que sean aceptables y que eviten los desperfectos en los vehículos. Otro aspecto a tener en cuenta en la eficiencia de las operaciones realizadas por el operador logístico recae en el aparcamiento de los vehículos importados, que permanecerán un tiempo indeterminado en la campa de almacenaje del puerto. La óptima realización de las actividades de incorporación en el aparcamiento repercutirá en una importante reducción de los costes de operación.



## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 OBJETIVO GENERAL

El principal objetivo del presente estudio es definir la estrategia de localización óptima de los vehículos de importación en la campa de almacenaje de las terminales portuarias de vehículos. Una asignación idónea de la posición de aparcamiento dentro de la campa repercutirá en varios aspectos que serán tratados a lo largo de este estudio. La utilización óptima del espacio disponible, la reducción de la mano de obra a disponer para realizar las tareas de aparcamiento, así como una reducción en las recolocaciones que deben realizarse para disponer de suficiente espacio para albergar a nuevos grupos de vehículos serán aspectos que deberán tenerse en cuenta para definir la mejor estrategia de aparcamiento para el operador logístico. Más que pretender encontrar un modelo de decisión único, se aportará al operador logístico de las herramientas necesarias para que la toma de decisiones se encamine hacia la máxima eficiencia de las operaciones a realizar en la terminal y que repercuta positivamente en la confianza de los clientes que interactúan con el operador.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Vinculados con el estudio realizado para el objetivo general, se generan varios objetivos específicos derivados del general. Estos se encaminan en el estudio de la terminal para poder entender mejor su funcionamiento.

- Argumentar la necesidad de disponer de una terminal portuaria en los puertos dedicada al intercambio de vehículos, ya sean para su exportación o importación o ambas actividades.
- Describir todas las actividades/tareas que se realizan en la terminal, considerando todo el conjunto como un sistema en el cual existen varios subsistemas interrelacionados.
- Definir los parámetros y las estrategias de que dispone el operador logístico para caracterizar cada uno de los subsistemas de la terminal.
- Modelar varias estrategias de aparcamiento para la campa de almacenaje que, a partir de los parámetros comentados anteriormente, respondan correctamente a los estándares de eficiencia, coste y calidad requeridos en la terminal.
- Dotar al operador logístico de las herramientas de decisión necesarias para desarrollar las tareas de la terminal con la máxima eficacia posible, pudiéndose detectar, mediante una extracción de datos de la campa, si se producirán ineficiencias en la terminal de vehículos.



### **1.3 ENFOQUE METODOLÓGICO**

Para poder obtener unos resultados que pudieran ser comparados con la utilización de varias estrategias de aparcamiento, previamente se ha debido analizar cuáles son los parámetros que influyen de manera directa en la mejora de las operaciones a realizar en el proceso de aparcamiento de estos vehículos importados. Una vez definidos los parámetros a analizar, se han propuesto varias estrategias de aparcamiento de vehículos de las cuáles se han obtenido analíticamente unos valores de eficiencia que podrán ser analizados por parte del operador logístico.

Precisamente, se ha estudiado la influencia de tres estrategias de aparcamiento sobre cuatro parámetros que se han definido como clave para la eficiencia de la terminal. El primer parámetro se refiere a la distribución en planta de las zonas de aparcamiento, analizando la capacidad máxima de la terminal vehículos al definirse un área concreta. Esta distribución en planta no solo puede significar una óptima utilización del espacio, sino que también puede influir en los tiempos de incorporación de los vehículos al aparcamiento. Estos tiempos de incorporación serán analizados, siendo éste un segundo parámetro de decisión. El tercer parámetro se centra en el estudio de la mano de obra utilizada para la incorporación de los vehículos procedentes de los buques en la campa de almacenaje. Este estudio de la mano de obra se basará en el análisis de la productividad de los conductores a la hora de realizar las operaciones de aparcamiento dado una distribución en planta concreta. Por último, se ha analizado detalladamente la influencia de las recolocaciones de vehículos que se producen en el interior de la campa de almacenaje, y que suponen una ineficiencia para el operador logístico al ser tareas no remuneradas por los clientes. Una minimización de estas tareas de recolocación supondrá una importante reducción de los costes de operación por parte del operador logístico, al poder utilizar una menor mano de obra para las tareas de aparcamiento de vehículos y obtener ratios de desperfecto en los vehículos menores al tener menos movimientos internos en la campa de almacenaje.

Gracias a una modelización de la localización de vehículos en la terminal, y la evaluación temporal de las tres estrategias propuestas, se han podido obtener unos resultados que, adaptándolos a las estrategias de aparcamiento consideradas, han dado al operador logístico las herramientas necesarias para reducir costes operativos para la realización de las operaciones de aparcamiento y entrega de los vehículos en la terminal.



## **1.4 ESTRUCTURA**

La lógica estructuración del estudio se entiende por realizar una primera introducción al modelado de las terminales portuarias, y más específicamente a las que tratan el transporte de vehículos. Así, una primera introducción de la evolución que han sufrido estas terminales portuarias a lo largo de los últimos años ayudará al lector a entender de la importancia de éstas para la economía de un país y la necesidad de optimizar sus operaciones para reducir al mínimo los costes de explotación. Seguidamente, es necesario descubrir cuáles son los procesos que se desarrollan en el interior de la terminal, siendo de especial interés los que se realizan entre distintas partes de esta.

Una vez conocidas las tareas de movimiento de vehículos llevadas a cabo por los conductores empleados en la terminal, se ha precisado centrar el estudio en un sentido del proceso, por lo que el escogido es el proceso de importación de vehículos. En la dirección tomada de ceñir el problema, se pretende también centrarse únicamente en un único subsistema de la terminal para que los resultados de su optimización sean lo más eficientes posibles. En este sentido, en un nuevo capítulo se estudiarán los procesos que suceden en la campa de almacenaje, donde tanto el aparcamiento de los vehículos como los movimientos que en la campa se realizan deberán ser estudiados.

Para completar este estudio, se ha precisado de la realización de un proceso de modelización de la campa, que conjuntamente con la presentación de tres estrategias de aparcamiento se ha podido definir con exactitud lo sucedido en la campa de almacenaje. Gracias a la simulación con distintos niveles operacionales, finalmente se han obtenido unos resultados que pueden ser interpretados por el operador logístico para mejorar la operatividad y eficiencia de las tareas llevadas a cabo en la terminal portuaria de vehículos.



## **CAPÍTULO 2**

---

### **DESCRIPCIÓN DE UNA TERMINAL PORTUARIA DE VEHÍCULOS**



## 2.1 INTRODUCCIÓN

El capítulo en cuestión quiere aportar las ideas principales de la importancia de disponer de un espacio de vasta extensión para el almacenaje de vehículos en las zonas portuarias, así como de cuáles son los procesos que se desarrollan en estas terminales del puerto. A partir de este análisis previo, el hallazgo de las deficiencias que se producen en el sistema será más eficiente, así como la construcción de un modelo de almacenaje para intentar mitigar al máximo los problemas que puedan suceder.

Para poder describir correctamente una terminal portuaria de vehículos, el capítulo se estructurará en dos apartados descritos a continuación. En el primer apartado se incidirá brevemente en la historia más reciente del automóvil. Analizar cómo ha evolucionado su producción y distribución nos aportará el porqué de una zona de almacenaje para vehículos cerca del muelle. Será este simple enfoque inicial el que nos permitirá en un segundo apartado analizar más ampliamente los procesos que transcurren dentro de la terminal y describir su funcionamiento desde la llegada de los vehículos al puerto, hasta la salida de éstos definiendo una serie de subsistemas para la terminal portuaria.

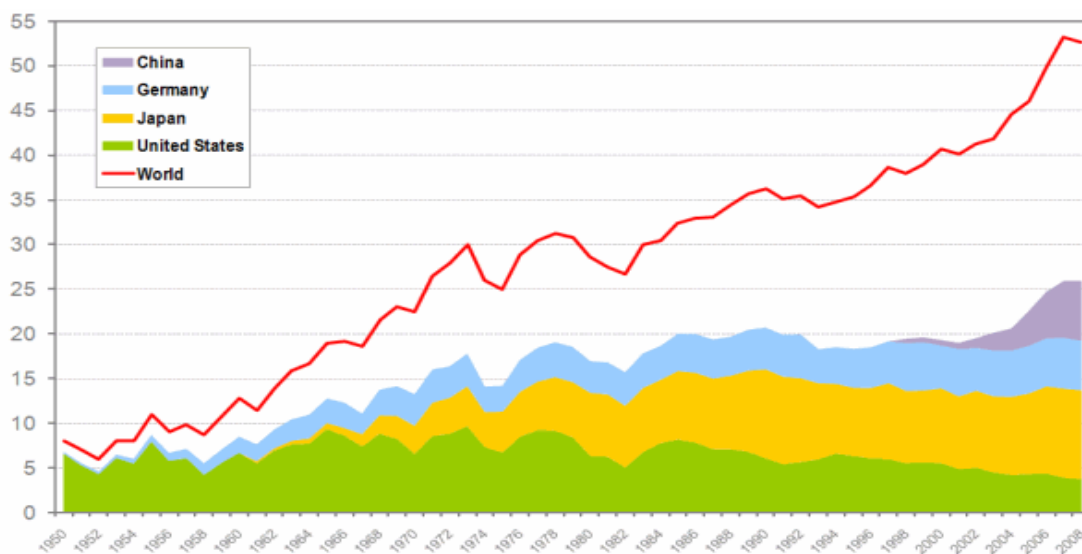
## 2.2 LA NECESIDAD DE UNA TERMINAL DE VEHÍCULOS

La industria del automóvil fue durante el siglo XX una de las industrias que experimentó un mayor desarrollo en Norte América, Japón y la Europa Occidental. Ésta fue el motor económico en numerosas etapas del siglo, además de propiciar la expansión de otros sectores industriales debido a la complejidad de la producción de automóviles. Ya desde los inicios, los primeros productores norteamericanos reconocieron la importancia de las economías de escala para poder expandirse en el sector debido a la gran inversión inicial para la producción en masa de vehículos. Esta expansión la protagonizaron empresas del sector como Ford y General Motors, que unieron esfuerzos para seguir creciendo en otros mercados. Posteriormente, Japón consiguió entrar en el mercado con éxito debido a su importante reducción de costes de producción y distribución (Amasaka, 2002). Principalmente la reducción de distribución se debe atribuir a la localización de los centros productores cerca de los países donde son exportados los vehículos, hecho que comportó un ahorro importante en el transporte de los mismos. En la pasada década, Europa se convirtió en el principal productor de vehículos gracias a la aparición de la Unión Europea y su eliminación de barreras al comercio, que se utilizó para la localización de los centros productores en los países europeos del Este, donde los costes de producción eran inferiores.

Las tres estrategias de reducción de costes de producción y distribución analizadas anteriormente han propiciado distintos métodos de expansión de la industria del automóvil en todo el mundo. El principal punto en común que presentaron los tres métodos de expansión fue la deslocalización de la producción de automóviles en el propio país. Esta deslocalización propició un dramático incremento del volumen a



transportar, hecho que ha afectado directamente el transporte marítimo y los puertos de todo el mundo.



**Figura 2.1** - Producción de automóviles en millones por países entre 1950 y 2008 (Fuente: OICA, Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles)

La variedad de modelos dentro de un mismo segmento de vehículo, para propiciar la atracción del consumidor, ha revolucionado la distribución de vehículos en los últimos años creando una nueva estrategia que reduce costes y tiempos de entrega. Esta diversificación de la oferta de vehículos ha supuesto la reducción de ventas de un modelo concreto en los mercados regionales, cosa que ha influido también en el aumento de la frecuencia de transportes. Para garantizar estas frecuencias, los productores han unido esfuerzos y realizan los transportes conjuntamente en pequeñas cantidades de vehículos de un modelo en concreto a los distintos puertos a servir. Es tal la unión de esfuerzos, que el 90% del mercado del transporte de vehículos por vía marítima está dominado por tan solo 6 operadoras logísticas multinacionales. A este hecho se le deben sumar las restricciones temporales de entrega del producto, hecho que también influye de manera importante en el transporte de los vehículos. Como resultado de estos factores, los productores han encarado su estrategia global de transporte hacia la de *hub & spoke*, que potencia la localización de una serie puertos preferenciales (*hubs*), desde los que se almacenan mayor número de vehículos para su posterior distribución hacia los puertos de categoría inferior mediante cabotaje, realizado con barcos tipo *feeder*.

Para satisfacer esta estrategia de *hub & spoke*, los puertos han habilitado espacios cercanos al muelle para poder almacenar allí los vehículos que posteriormente volverán a cargarse en otros barcos destinados al cabotaje, usando la estrategia de buques Ro-Ro (*Roll on – Roll off*). A parte del espacio destinado para almacenar estos vehículos que en ventanas temporales reducidas volverán a salir por vía marítima del puerto, también se destina una importante extensión de terreno para almacenar el stock de vehículos que se debe comercializar en el *hinterland* del puerto. La ventana temporal desde que el cliente decide adquirir un vehículo en concreto



hasta que lo recibe no debe sobrepasar los 14 días, hecho que supone un ahorro que puede llegar a 10.000 millones de euros a nivel mundial (Holweg y Miemczyk, 2003) gracias a la reducción de stock de vehículos en los concesionarios.

En este punto, es de vital importancia describir los modelos de buque utilizados para el transporte de los vehículos. Tal y como se ha anunciado anteriormente, se utilizan buques Ro-Ro, que se denomina al tipo de barco que transporta cargamento rodado que puede ser cargado (*roll on*) y descargado (*roll off*) por las rampas que los propios buques tienen. Dentro de los buques Ro-Ro existen tres tipos de buque utilizados para el transporte de vehículos nuevos, los *Pure Car Carriers* (PCC), los *Pure Car Truck Carriers* (PCTC) y los *Large Car Truck Carriers* (LCTC). El primero de ellos transporta únicamente coches, mientras que el segundo, y más común de los tres, combina el transporte de coches con el de camiones. Actualmente estos buques PCTC transportan hasta 7.600 coches en 13 niveles, pudiendo combinar estos niveles para cumplir con las características técnicas que presentan camiones, autobuses, tractores y bulldozers. Por último, el tercer tipo de buque (LCTC) es de recién aparición y permite albergar hasta 8.000 coches o una combinación entre coches, autobuses y camiones bastante equilibrada (ver figura 3.2).



**Figura 2.2** - LCTC Obreron del operador Wallenius Wilhelmsen (Fuente: Wallenius Wilhelmsen)

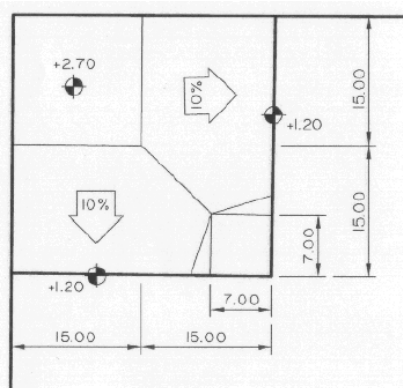
## 2.3 LA TERMINAL PORTUARIA DE VEHÍCULOS COMO SISTEMA

Una terminal portuaria de vehículos se describe como una zona de intercambio modal para el transporte marítimo y terrestre de vehículos a comercializar, dotado de una capacidad de almacenamiento extensa cerca del muelle de carga y descarga, así como de los medios necesarios para realizar este intercambio y satisfacer las necesidades de productores, operadores logísticos, concesionarios y clientes. Las características básicas que toda terminal portuaria de vehículos debe tener para



ofrecer un nivel de servicio adecuado son: accesibilidad, capacidad y actividades de valor añadido.

- **Accesibilidad:** La situación del puerto es inamovible y no está sujeta a decisiones estratégicas. Es por esto que las Autoridades Portuarias deben invertir en mejorar la conexión por carretera y ferrocarril con el *hinterland*, así como facilitar al máximo la llegada de los buques reduciendo las distancias a mar abierto. Estas conexiones entre el *hinterland* y el *voreland* serán las que favorecerán un puerto respecto a los otros. A nivel técnico y estructural, es preciso ajustar la altura del muelle y los atraques Ro-Ro a las características de los buques, ya que el ángulo máximo al que las rampas de carga y descarga de vehículos pueden estar operativas es de 12 grados, para evitar de esta manera posibles desperfectos en los vehículos.



**Figura 2.3** - Detalle en planta de un atraque Ro-Ro doble en una esquina de muelle con rampas al 10%

- **Capacidad:** Un puerto será más competitivo cuánto más espacio para almacenar vehículos tenga cerca del muelle de carga y descarga. Consecuentemente, el tiempo necesario para aparcar los vehículos dentro de la campa se verá drásticamente reducido, necesitando así menores recursos de tiempo y personal para realizarlo.
- **Actividades de valor añadido:** Esta característica está estrechamente relacionada con la capacidad de la campa disponible en el puerto, ya que estas actividades ocupan un cierto espacio dentro de la terminal debido a la necesidad de construcción de una instalación complementaria. Estas actividades de valor añadido, que consisten en ultimar los componentes extraordinarios de los vehículos que llegan de serie de las fábricas, van a reducir considerablemente el tiempo de entrega del vehículo al consumidor y darán, a su vez, una componente de calidad al servicio ofrecido por la terminal. A parte de estas actividades de instalación de componentes, también se realizan las debidas inspecciones técnicas y de seguridad de los vehículos previa entrega al cliente.



El objetivo esencial de una terminal de vehículos es proporcionar los medios y la organización necesarios para que el intercambio entre los modos de transporte terrestre y marítimo se produzca en las mejores condiciones de rapidez, eficiencia temporal y económica, seguridad y respeto por el medio ambiente (Saurí, 2002).

Los procesos que se realizan en las terminales portuarias de vehículos pueden diferenciarse a través de la procedencia o destino de los vehículos que llegan a ellas, ya sea por vía marítima o terrestre. Básicamente, se realizan tres procesos claramente diferenciados:

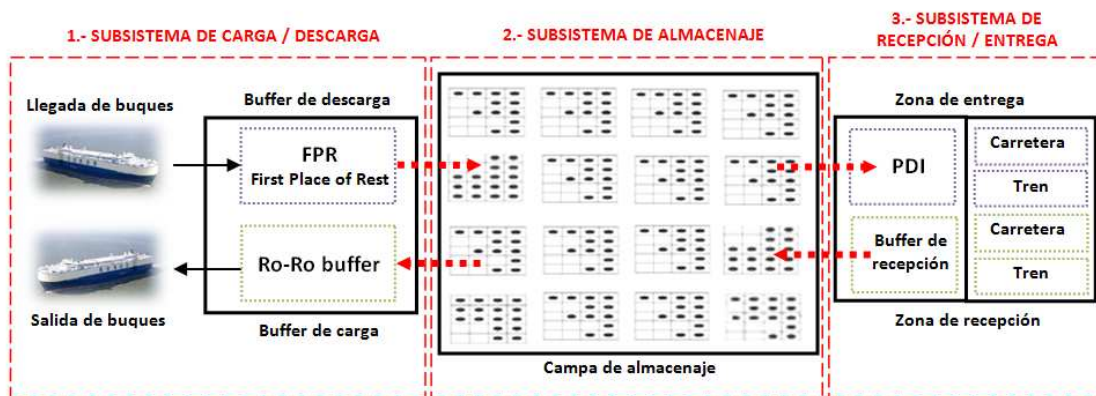
- a) Proceso de importación
- b) Proceso de exportación
- c) Proceso de tránsito

El proceso de importación es el que realiza el intercambio modal marítimo – terrestre de vehículos para el beneficio del hinterland del puerto. Por otra parte, el proceso de exportación realiza el camino contrario realizando el intercambio modal terrestre – marítimo, favoreciendo de esta manera la salida de vehículos fabricados en el propio país hacia mercados exteriores. Existe un tercer proceso llamado de tránsito que utiliza la estrategia de *hub & spoke* analizada anteriormente para descargar vehículos en el puerto, almacenarlos durante una ventana de tiempo determinada y, tras su compactación, cargarlos de nuevo en barcos de menor capacidad (buques *feeder*) para alimentar los puertos de menor categoría.

A parte de los tres procesos anunciados anteriormente, una terminal de vehículos puede ser entendida como un sistema integrado por varios subsistemas. Esta misma clasificación se produce en las terminales de contenedores tal y como propone en su trabajo Henesey (2004). Sin embargo, las operaciones que transcurren en el interior de la terminal de vehículos varían considerablemente de las que se producen en las de contenedores tal y como se ha analizado anteriormente. Los espacios en los que se divide físicamente esta terminal nos van a definir tres subsistemas, así como un cuarto subsistema que realizará las operaciones de conexión entre los tres anteriores:

- 1.- Subsistema de carga / descarga
- 2.- Subsistema de almacenaje
- 3.- Subsistema de recepción / entrega
- 4.- Subsistemas de interconexión

Dependiendo de si el sistema está trabajando en un proceso de importación, exportación o tránsito, el sistema adoptará una configuración de subsistemas u otra. En el caso de realizar un proceso de importación de vehículos al puerto, se activarán los subsistemas de descarga y entrega en el sistema, junto a los de almacenaje e interconexión. Consecuentemente, cuando se realiza un proceso de exportación de vehículos, se activarán los subsistemas de carga y recepción. En caso de tratarse de un proceso de tránsito, los subsistemas de descarga y carga se activarán a la vez, acompañados también del de almacenaje e interconexión.



**Figura 2.4** - Esquema de los tres subsistemas principales unidos entre ellos por los subsistemas de interconexión

Como se ha comentado con anterioridad, los tres subsistemas principales disponen de un área específica dentro de la terminal portuaria, tal y como se aprecia en la figura 4. El cuarto subsistema, llamado de interconexión queda representado en el esquema mediante las flechas discontinuas que pretenden identificar la conexión existente entre los tres subsistemas principales y que a continuación se van analizar más detalladamente.

### **Subsistema carga / descarga**

Dentro del subsistema en cuestión se realizan algunas de las operaciones más trascendentales que transcurren dentro de la terminal de vehículos. Estas operaciones se refieren al intercambio modal marítimo – terrestre o viceversa que sufren los vehículos y que son realizadas por personal especializado en estas actividades, como son los estibadores del puerto. La operación de descarga de los buques llevan implícitas una serie de actividades que siguiendo un orden cronológico se realizan sistemáticamente para la llegada de todos los buques al puerto y que son:

- Fondeo del buque en el puerto (si es necesario).
- Maniobras del buque dentro del puerto hasta amarrar.
- Posicionamiento de las rampas Ro-Ro
- Descarga de los vehículos desde el buque al buffer de descarga
- Inspección de desperfectos en los vehículos en el *First Place of Rest* (FPR de ahora en adelante) por parte del operador de la terminal.

Previo descarga de los buques en el puerto, se produce un importante flujo de información mediante intercambio de documentos entre distintos actores de la actividad portuaria que influye de manera directa en el cumplimiento de las ventanas temporales de que disponen los buques para realizar sus escalas. A continuación, y de manera esquemática y cronológica, se describirán cuales son estos documentos requeridos hasta la descarga de los vehículos:





- **Solicitud de atraque:** El agente consignatario (persona física o jurídica que actúa en nombre y representación del naviero o propietario del buque en el puerto) envía la solicitud a la Autoridad Portuaria como mínimo con 12 horas de antelación a la llegada del buque al puerto.
- **Asignación de atraque:** Una vez la Autoridad Portuaria acepta la solicitud, el departamento de atraques del puerto asigna un atraque al buque, documento que reafirma la autorización de entrada del buque al puerto y que permite al buque pasar de la zona de fondeo al interior del puerto hasta su amarre.
- **Informe provisional de descarga** (Incluye el listado provisional de descarga, la declaración sumaria y el plano de descarga): Una vez el buque ha sido amarrado (pueden empezar las operaciones de llenado de combustible y toma de agua), y previo a la descarga de los vehículos, este documento debe ser enviado y aceptado por la Autoridad Portuaria. Cuando es aceptado, los vehículos pueden empezar a ser descargados por parte de los conductores contratados por el operador logístico del puerto, que suelen tratarse de estibadores en prácticas.
- **Conocimiento de embarque, manifestación de carga y sobordo:** Paralelamente al informe provisional de descarga anterior, es necesario presentar estos tres documentos a Aduanas, que acreditarán la mercancía embarcada y el origen / destino de toda ella.

Por lo que se refiere a la operación de carga del buque, las actividades que incluyen esta operación son prácticamente las mismas que las realizadas para la descarga pero en sentido inverso:

- Inspección de desperfectos en los vehículos en el buffer de carga por parte del armador del barco.
- Carga de los vehículos desde el Ro-Ro buffer hasta el interior del buque.
- Retirada de las rampas Ro-Ro.
- Desamarre del buque
- Salida del puerto.

También para la operación de carga se requieren una serie de documentos, aunque en este proceso solo es necesario presentar el informe provisional de carga, que incluye el listado provisional de descarga, la lista de cancelaciones y añadidos, y el plano de carga. Una vez aceptados estos documentos por parte de la Autoridad Portuaria y Aduanas, el buque puede abandonar el puerto en cuestión y dirigirse hacia su próximo destino.





### **Subsistema de almacenaje**

Este segundo subsistema de la terminal portuaria de vehículos responde a la necesidad de disponer de una amplia superficie donde se puedan almacenar los vehículos durante periodos de tiempo indefinidos *a priori* y que cumplan los requerimientos de entrega de producto impuestos por productores, concesionarios y clientes. La gestión logística y de recursos de este subsistema influirá de manera directa en el resultado operativo del conjunto del sistema de la terminal. El principal objetivo del subsistema es satisfacer de manera eficaz los distintos ritmos de servicio que vienen impuestos por las operaciones de descarga y de recepción, ofreciendo la capacidad deseada para el almacenaje de los vehículos dentro de la campa. Es de vital importancia disponer de un espacio con capacidad suficiente para el volumen de vehículos que pasan por la terminal a diario, ya que si esta premisa no se cumple la terminal sufrirá una importante penalización. Esta falta de espacio va directamente ligada al precio del suelo en las zonas portuarias ya que, al ser actualmente zonas altamente ocupadas, adquiere valores elevados. Este hecho ha obligado a realizar estudios detallados de cómo gestionar la campa para optimizar al máximo la capacidad de la misma, reduciendo a su vez las remociones de vehículos dentro de ella. Cabe recordar que las operaciones realizadas dentro de la zona de almacenaje también son realizadas por estibadores del grupo 0 (estibadores en prácticas) subcontratados por el operador logístico de la terminal de vehículos.

De esta forma, los conductores se organizan por pandillas de habitualmente seis personas que se encargan de realizar el aparcamiento de los vehículos que se encuentran en el FPR, una vez ya inspeccionados por parte de los responsables de la terminal. Una vez esta operación de aparcamiento ha sido realizada, el conductor debe informar de la posición exacta del vehículo al centro de gestión de la terminal. De esta manera, cuando se prepara un pedido de salida de vehículos esta información es procesada informáticamente reduciendo notablemente los tiempos de compactación del pedido en el buffer de carga o en el de entrega. Es también de vital importancia la notificación por parte de la pandilla de conductores encargados del aparcamiento o retirada de los vehículos de la campa, de cualquier incidencia que se haya podido producir durante el traslado del vehículo dentro de la zona de almacenaje, tales como desperfectos, ralladuras, golpes o desperfectos interiores que no hubieran sido apreciados en la inspección inicial en el FPR (tanto en el de descarga como en el de recepción)

La zona de almacenaje puede estar estructurada con estrategias muy variadas tal y como se analizará posteriormente. Estas estrategias vienen gobernadas dependiendo de cuál sea el objetivo principal del operador logístico. Existen sistemas que pretenden optimizar la facilidad de interconexión entre subsistemas diseñando zonas de almacenaje adaptadas a los movimientos de los vehículos. En cambio, existen otras zonas de almacenaje que pretenden reducir al mínimo las recolocaciones a realizar dentro de la campa con una estructura determinada. El que ambas estrategias quieren conseguir es la reducción de los desperfectos en los vehículos, hecho que depende directamente de la capacidad de gestión de los vehículos por parte de los conductores.



### **Subsistema de recepción / entrega**

El principal objetivo de este subsistema es el de facilitar la recepción o entrega de los vehículos de una manera rápida, eficaz y con las condiciones de seguridad idóneas tanto para trabajadores como para la propia mercancía. Este objetivo se alcanza mediante la interconexión existente entre la terminal portuaria y el *hinterland* del puerto. Actualmente, los modos de transporte utilizados para tal conexión son el transporte por carretera y ferrocarril. Si bien es cierto que el transporte por carretera mediante tráileres concentra el mayor porcentaje del transporte de vehículos, el transporte ferroviario también está presente en la mayoría de puertos en menor proporción. Como bien se conoce, la capilaridad del transporte por carretera, su alto grado de automatización, y el disponer de una red de carreteras suficientemente desarrollada, lo hacen de gran eficacia a la hora de distribuir los vehículos hasta los puntos de entrega o de recibirlos por parte de la terminal, cargados previamente en las fábricas productoras.

Una vez el pedido de entrega ha sido recibido por parte del operador logístico de la terminal, se recolectan los vehículos que deberán ser cargados y entregados. Anterior a la entrega, estos vehículos deberán pasar por el PDI (zona de inspección de pre-entrega o *Pre-Delivery Inspection*). Es en esta zona de la terminal donde se realizan todas las actividades de valor añadido anteriormente comentadas, así como una inspección de los vehículos por parte del transportista antes de ser cargados en el tráiler. Por lo que se refiere al proceso de recepción de los vehículos por parte de la terminal, se sigue un proceso parecido al de descarga de los buques. Los estibadores contratados descargan los vehículos en el buffer de recepción, donde serán inspeccionados por el operador logístico antes de pasar a formar parte de la campá de almacenaje.

### **Subsistemas de interconexión**

Para que una terminal de vehículos cumpla con los objetivos que como sistema se le imponen, necesita que los tres subsistemas anteriores trabajen solidariamente. Esta unión la proporcionan los subsistemas de interconexión, que se encargan de dar respuesta al movimiento de los vehículos entre las zonas que comprenden los tres subsistemas principales (carga/descarga, almacenaje y recepción/entrega). La importancia de estos subsistemas reside en que deben adaptarse a las ventanas temporales y los requerimientos técnicos de los demás subsistemas, siendo los que necesitan de un especial análisis para mejorar y optimizar sus actividades.

Las actividades que se realizan en estos subsistemas de interconexión hacen referencia a la transferencia de los vehículos entre el primero y el segundo subsistema (descarga a almacenaje o almacenaje a carga), y entre el segundo y el tercer subsistema (almacenaje a entrega o recepción a almacenaje). De la optimización de las operaciones de aparcamiento y retirada de los vehículos de la campá, así como de las ventanas temporales que usan los conductores para tal fin, dependerá la eficiencia de la terminal de vehículos. Posteriormente se apuntarán las claves teóricas influyentes en la optimización de estas operaciones.

## **CAPÍTULO 3**

---

### **ESTADO DEL ARTE EN OPERACIONES PORTUARIAS**



### 3.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo pretende realizar un análisis de la situación actual en la que se encuentra la optimización de las operaciones en las campas de las terminales portuarias de vehículos.

Para aportar una visión detallada de esta situación es necesario estudiar los antecedentes existentes en materia de optimización de operaciones en terminales portuarias. El estudio de las operaciones en las terminales de vehículos es de reciente conocimiento, por lo que la mayoría de aportaciones en esta materia se han encaminado a adaptar la metodología aplicada en las terminales de contenedores, donde los investigadores han centrado la mayoría de sus esfuerzos en las dos últimas décadas.

Para afrontar correctamente el problema de optimización, se seguirá el esquema lógico del proceso de importación, analizando las investigaciones hechas en cada tramo del proceso, desde la llegada de los buques hasta el almacenamiento de la mercancía en la campa. En un primer apartado, se abordarán las aportaciones hechas en materia de optimización de operaciones en las campas de una terminal portuaria, centrando el estudio en la óptima ubicación de la mercancía transportada para minimizar la utilización de recursos. A partir de esta aproximación, se planteará en un segundo apartado cuál es el escenario actual de la optimización de las operaciones de las terminales, centradas específicamente en el estudio de las recolocaciones de vehículos.

### 3.2 OPTIMIZACIÓN DE OPERACIONES EN TERMINALES DE CONTENEDORES

A principios de los años noventa, varios autores como Taleb-Ibrahimi (1989) o Castilho y Daganzo (1993) iniciaron el estudio de las operaciones de una campa portuaria de contenedores proponiendo diversas optimizaciones de los distintos procesos allí presentes. Básicamente los esfuerzos se centraron en un correcto dimensionamiento de las zonas de almacenaje que, juntamente con una óptima localización de las mercancías, redujera el número de recolocaciones a realizar en el interior de la campa de almacenaje. Con la optimización de estos procesos se conseguía aumentar la eficiencia de las operaciones logísticas, así como la reducción de los costes de explotación debido a la localización de las ineficiencias en los procesos.

La mayoría de procesos de intercambio de bienes que se producen en un puerto requieren de un sistema de almacenaje que se encuentre cercano al muelle. Castilho y Daganzo (1993) estudiaron los factores influyentes en la cantidad de recursos requerida para realizar las operaciones de consolidación y retirada en la campa de almacenaje, siguiendo los estudios propuestos por Taleb-Ibrahimi (1989). Para ello, optaron por definir dos estrategias básicas de almacenaje para la



importación de contenedores. La primera se centraba en mantener constante el volumen para cada apilado, mientras que la segunda pretendía segregar los contenedores en función del tiempo de llegada a puerto. La simplicidad de las expresiones ayudó a tener una primera visión de cómo debía encaminarse el diseño de una terminal portuaria cuando los tiempos de llegada de los barcos y el tiempo de permanencia de los contenedores son desconocidos. Las dos estrategias de decisión no pretendían buscar un óptimo, sino simplemente introducir las principales características de segregación o compactación de la mercancía importada, a partir de las cuáles el operador logístico pudiera tomar las decisiones más convenientes para sus operaciones. Estos dos autores proponían como metodología a ser investigada en un futuro el hecho de desarrollar estrategias que asignaran de manera dinámica una óptima localización de la mercancía, tanto importada como exportada.

Varios fueron los autores que en años posteriores prosiguieron con el estudio propuesto por Castilho y Daganzo (1993). Preston y Kozan (2001) aportaron un modelo de localización óptima de contenedores para terminales portuarias. Los autores se basaron en conseguir un nivel operacional para la terminal que consiguiera minimizar la necesidad de mano de obra y los tiempos de transporte hasta la ubicación de los contenedores. Como resultado, obtuvieron que una reducción lineal de los recursos asignados a un muelle producía un incremento exponencial del tiempo de almacenamiento, mientras que cambios en la utilización del espacio de almacenaje se traducían en un incremento lineal del tiempo de almacenamiento (entre un 10 y un 50%). Siguiendo con las investigaciones en la misma dirección, varios autores como Kim et al. (2000), y Kim y Kim (2002) aportaron nuevas perspectivas al añadir al problema inicial la definición de tamaño óptimo de un bloque de contenedores. Con esta definición se pretendía avanzar en la interrelación entre la localización de la mercancía y los recursos que debían ser destinados para realizar la tarea de incorporación a la cama de almacenaje. Varias estrategias se usaron para el estudio, pudiéndose adaptar, posteriormente, la mayoría de ellas a las camas de vehículos por su gráfica y sencilla aplicabilidad.

Una vez estudiada la óptima distribución de los recursos y una correcta localización de la mercancía que permitiera la minimización de los tiempos de incorporación a la cama de almacenaje, era necesario avanzar la investigación hacia el campo de las recolocaciones en el interior del sistema. La recolocación de contenedores es símbolo de ineficiencia para un operador logístico, al ser un factor decisivo en el incremento de los costes que percibe el cliente. Para reducir este número de recolocaciones, Yang y Kim (2006) propusieron dos problemas de localización, uno estático y otro dinámico. Con ello, pretendían conseguir, a partir de un algoritmo genético, la solución óptima de localización de la mercancía para minimizar estas recolocaciones. Mezclando la mercancía con distintos tiempos de llegada en la misma zona de almacenaje, se conseguía reducir la zona de almacenamiento necesaria. A su vez, la localización de estos contenedores se basaba en conseguir un número de recolocaciones mínimo durante el proceso de retirada. La decisión de la localización óptima se tomaba a partir del valor de unos pesos relativos, traducibles a costes operacionales (ratios de espacio y tiempo).



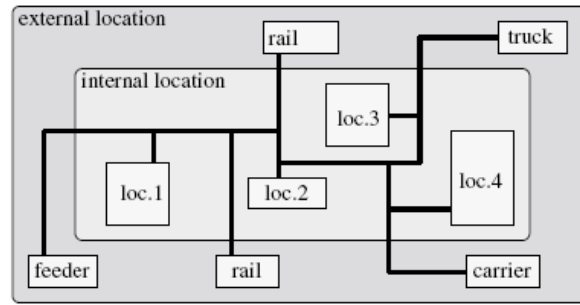
Para abordar el proceso de optimización de las operaciones en las terminales de vehículos era necesario analizar cuál había sido el orden cronológico seguido en la optimización de las operaciones en las terminales de contenedores hasta el momento. Este camino era el único posible para descubrir en qué fase se encontraba la optimización de las tareas en las campas de vehículos, para así enfocar el análisis de la manera más eficaz y correcta posible.

### 3.3 OPTIMIZACIÓN DE OPERACIONES EN TERMINALES DE VEHÍCULOS

La optimización de las operaciones en las terminales portuarias de vehículos se trata de un campo de reciente exploración dentro de la investigación en el campo de los transportes. Al tener los muelles de contenedores un peso específico muy superior en el volumen de ingresos de los puertos, se le han destinado a éstos la mayoría de recursos y estudios realizados. Los pocos investigadores que se han adentrado en el estudio de las terminales de vehículos provienen de zonas cercanas a puertos del norte de Europa, como Alemania, donde la industria del automóvil tiene un peso importante en la economía del país.

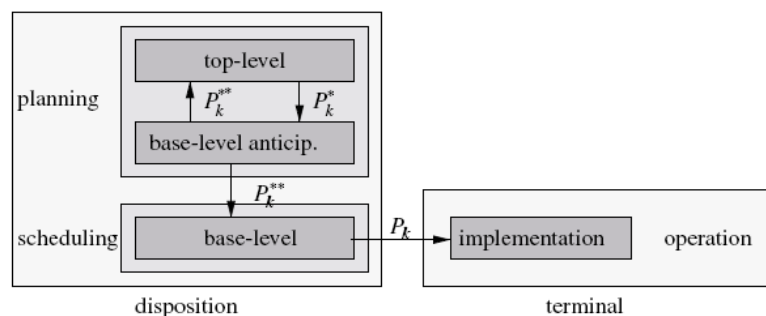
Tal y como se había iniciado con la investigación en operaciones con contenedores, se propuso inicialmente una visión de cuál era la situación de las terminales de vehículos para desarrollar, posteriormente, un modelo de decisión para la contratación óptima de mano de obra y control sobre el inventario dentro de la campa de almacenaje (Mattfeld y Kopfer, 2003). Los autores en cuestión, proponían una separación jerárquica del modelo a optimizar en *submodelos*, desarrollando heurísticos para solucionar los *subproblemas* existentes en la terminal portuaria de vehículos de *Bremerhaven*, en la ciudad alemana de Bremen, uno de los puertos más importantes de tráfico de vehículos por vía marítima de Europa. La propuesta de un primer esquema de división de las partes que conformaban una terminal de vehículos permitió introducir dos tipos de localizaciones, las internas conformadas por las zonas de aparcamiento, y las externas con los puntos de interconexión de la terminal con el exterior. Esto, a su vez, introdujo dos sistemas de monitoreo diferenciados temporalmente, el sistema de planificación a medio plazo y el de programación a corto plazo (Figura 3.1).

El modelo matemático propuesto integraba la planificación de la mano de obra. La función objetivo pretendía optimizar los requerimientos de personal para realizar las tareas preestablecidas. La minimización de los conductores requeridos para realizar una serie de tareas a lo largo de unos turnos predefinidos resultaría en una solución de coste mínimo. Como muy bien apuntaron los autores, esta reducción de personal incumplía los criterios de seguridad y ratios de desperfectos en vehículos (menores al 1%). En este sentido, se prefirió nivelar las necesidades de personal repartiendo las tareas a lo largo de los turnos considerados para cumplir con estos niveles mínimos de calidad exigidos al operador logístico por parte de sus clientes.



**Figura 3.1** – Esquema de localización de las partes de una terminal de vehículos, divididas en localizaciones internas y externas, conectadas por varias vías de comunicación (Mattfeld y Kopfer, 2003)

Para conseguir esta solución óptima se prefirió dividir el problema en dos *subproblemas* jerarizados. El primero (*Top-level model*) procesaba cada tarea y decidía el turno de ejecución y la localización exacta de los vehículos, estimando el personal necesario ( $P_k^*$ ) para realizar la tarea de aparcamiento impuesta. El segundo problema (*Base-level model*) ya recibía la información del turno y la localización exacta de los vehículos de la tarea en concreto. La función de este segundo problema era la de distribuir los grupos de conductores que realizaban las tareas de aparcamiento en un turno para que la necesidad de personal ( $P_k$ ) fuera lo más cercana posible a la media de personal mínimo para todos los turnos ( $P_k$ ). Si el problema principal calculaba una necesidad de personal necesaria poco aproximada al valor inicial  $P_k$ , existía un problema intermedio (*Base-level anticipatory*) que adaptaba, mediante las ventanas temporales, la necesidad de personal ( $P_k^{**}$ ) para acercarla al nivel de personal inicial  $P_k$ , y así reducir al mínimo los sobrecostes de contratación de personal ( $P_k^* - P_k$ )



**Figura 3.2** – Esquema de los subproblemas de planificación (*top-level* y *base-level anticipatory*) y programación (*base-level*) para el cálculo de la necesidad de personal óptima  $P_k$  que será implementada en la terminal (Mattfeld y Kopfer, 2003)

Este modelo utilizado por Mattfeld y Kopfer (2003) se aplicó a la terminal Bremerhaven y se tradujo en un importante incremento de la productividad. Aunque se esperaba que un aumento en el volumen de vehículos transferidos en la terminal produjera un aumento en los tiempos de aparcamiento, la aplicación de la metodología propuesta supuso pasar de un tiempo de introducción de los vehículos en la cama de





almacenaje de 9,21 minutos en el año 2000, a 9,17 minutos en el 2001. Por lo que a la retirada de la campa respecta, la reducción fue aún más destacable, pasando de 15,2 minutos a 14,8 minutos en los mismos años de análisis. Así, se pudo concluir que se había producido un aumento de la productividad del 16,3%, hecho que suponía reducir los costes de explotación en más de 1 millón de dólares anualmente.

Siguiendo con la investigación empezada por Mattfeld y Kopfer (2003), Fischer y Gehring (2005) prosiguieron en el desarrollo de la metodología de optimización de operaciones iniciada por los primeros autores. Viendo los buenos resultados que había proporcionado el análisis de los problemas de localización y necesidad de personal conjuntamente, se prosiguió en este sentido proponiendo un sistema multi-agente (MAS) que determinara distintos niveles de prioridad para la toma de las decisiones. Con la simulación de distintos algoritmos, concluyeron que los costes operacionales de la terminal dependían directamente del número de conductores contratados permanentemente y del coste suplementario que suponía contratar conductores temporales para las puntas de trabajo. Con estas dos variables de decisión, basadas en costes relativos, se conseguía dotar al operador logístico de un *trade-off* entre el número de conductores contratados permanentemente y los contratados temporalmente para que tomara las decisiones más adecuadas para sus actividades en la terminal.

Como sucedió con el desarrollo del estudio de los procesos para contenedores expuesto en el apartado anterior, aparte de optimizarse los procesos de localización y utilización de mano de obra, debían analizarse otros aspectos fundamentales como son la definición de las áreas óptimas de aparcamiento y la estrategia de recolocaciones. En este sentido, los estudios recientes deben enfocarse en completar el análisis global de todas las operaciones que se producen en una terminal portuaria de vehículos. Los cuatro autores anteriormente comentados, ya utilizaron buena parte de la metodología expuesta por Iranpour y Tung (1989), y Cassady y Kobza (1998) en lo que diseño de áreas de almacenamiento de vehículos se refiere. Iranpour y Tung (1989) propusieron un nuevo diseño óptimo para la distribución en planta de las campas que maximizara la capacidad y redujera al mínimo las maniobras de aparcamiento. Como se expondrá a lo largo del estudio, este diseño ha tenido un gran éxito de implantación, no solamente en las campas de almacenaje sino en cualquier tipo de aparcamiento. Cassady y Kobza (1998), en cambio, centraron sus estudios en encontrar una elección óptima de plaza de aparcamiento que redujera el tiempo de acceso y la distancia hasta el aparcamiento, considerando dos estrategias de selección. Estas dos estrategias tenían en cuenta las decisiones subjetivas de los conductores así como el nivel de ocupación de la instalación para encontrar, mediante una aproximación probabilística, cuál era la plaza de aparcamiento óptima.





### **3.4 ESCENARIO ACTUAL EN LAS TERMINALES DE VEHÍCULOS**

A lo largo de esta última década se ha avanzado muy positivamente en la optimización de las operaciones que transcurren en el interior de las terminales de vehículos. Si bien es cierto que la investigación de estos procesos es reciente, se ha podido utilizar buena parte de la metodología desarrollada para las terminales de contenedores adaptándola a los requerimientos técnicos de las terminales de vehículos. Las optimizaciones obtenidas para los primeros estudios han sugerido mejoras considerables que se han traducido en aumentos de la productividad de los procesos que se llevan a cabo en la terminal, básicamente gracias a una mejor jerarquización de los problemas que se producen.

En el actual contexto económico, no es suficiente en intentar mejorar la productividad de los operadores logísticos como se ha realizado hasta este momento, sino que se requiere de una optimización de los procesos que se traduzca en una reducción de los costes de explotación de las campas. En este sentido, la investigación que este estudio propone, debe encaminarse en la creación de unos modelos de decisión que ayuden a los operadores logísticos a tomar las decisiones más acertadas para sus terminales, según una serie de características, y que les ayuden a aumentar el margen de beneficio en sus operaciones. Más concretamente, se ha identificado el problema de las recolocaciones de vehículos en las terminales de vehículos como uno de los problemas que causa más ineficiencia al operador logístico, tanto a nivel de productividad como de desperfectos en los vehículos. Este parámetro de las campas de almacenaje todavía no ha sido investigado en profundidad a nivel de vehículos por ningún autor. De esta manera, una vez analizada la situación, se podrán proponer ciertas mejoras a las terminales de vehículos que de bien seguro serán recibidas con gratitud por parte de los operadores logísticos de las mismas.

## **CAPÍTULO 4**

---

### **EL PROCESO DE IMPORTACIÓN**



## **4.1 INTRODUCCIÓN**

El presente capítulo pretende profundizar en uno de los tres procesos que se producen en una terminal portuaria de vehículos y que atiende a la llegada de vehículos a la terminal por vía marítima. El proceso de importación necesita de los cuatro subsistemas planteados en el esquema teórico para su óptimo desarrollo y funcionamiento, tal y como se ha descrito en el capítulo 2. A continuación, se plantearán los actores y las principales características de cada uno de los subsistemas para poder realizar la correcta modelización del proceso de importación. A partir de esta modelización se conseguirá la optimización de las operaciones que ocurren en la terminal gracias a una toma de decisiones estudiada y adecuada a las necesidades del operador logístico.

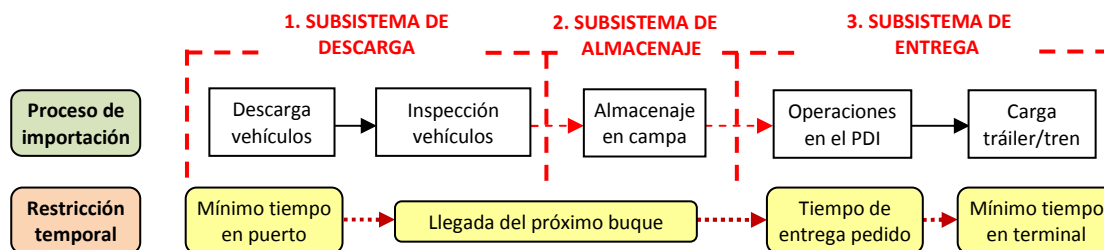
Para su desarrollo óptimo, el capítulo se estructurará inicialmente con un primer apartado que pretende aportar una profundización en los parámetros y las características de cada subsistema. A continuación, se analizarán las estrategias posibles que la cadena de importación presenta en cada subsistema del proceso. Esta batería de estrategias pretende ser el punto de partida para la creación de un modelo de localización de vehículos de importación en una terminal portuaria que se expondrá en los próximos capítulos.

## **4.2 DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES**

El proceso de importación de vehículos en un puerto constituye la mayor entrada de vehículos fabricados en el extranjero para un país. Debido a los elevados niveles de operaciones de descarga que se realizan en el muelle, deben estudiarse detenidamente todas las acciones que contribuyen a tal proceso. Por eso, desde la llegada de los buques a la zona de fondeo del puerto hasta su salida, una vez entregados los vehículos demandados por el operador logístico del puerto, es de vital importancia modelar el comportamiento temporal de las acciones realizadas para poder optimizarlas y así aumentar la eficiencia global del proceso de importación.

Para poder conseguir el óptimo del proceso de importación, es necesario estudiar particularmente cada subsistema para llegar a los correspondientes subóptimos que, finalmente, nos permitirán obtener el óptimo global del proceso. En esta línea, se pretende seguir la clasificación de subsistemas propuesta en el capítulo 2 de manera cronológica para abordar tal problemática.

En la figura 4.1 se presenta un esquema teórico básico del proceso de importación donde se observa la clasificación de las actividades por subsistemas, así como las restricciones temporales impuestas para cada actividad o subproceso. Este esquema del proceso de importación se presenta como base para modelar las actividades básicas que tal proceso realiza, estudiándose en capítulos posteriores las variaciones que tal esquema puede sufrir dependiendo de las restricciones temporales y de espacio de la terminal.



**Figura 4.1** - Esquema del proceso de importación y las restricciones temporales impuestas

Tal y como se ha aportado en el capítulo 2, el proceso de importación está formado por una serie de subprocesos que pueden englobarse en alguno de los cuatro subsistemas planteados. Con la llegada de los buques al puerto, se inicia la primera actividad que consiste en la descarga de los vehículos al muelle de la terminal de vehículos. Tal actividad viene regida por la restricción temporal de mínima estancia del buque en el puerto. Es conocido que un buque obtiene sus ingresos cuando está en tránsito, es por esto que todo exceso de tiempo que el buque está en la terminal le penaliza. En este sentido, si el tiempo excede el mínimo, se entiende que el nivel de servicio que el operador logístico está ofreciendo no es óptimo para el armador.

Una vez descargados los vehículos, se procede a la inspección de los mismos en el buffer FPR (*First Place of Rest*), para posteriormente trasladarlos a la campa de almacenaje. Estas dos actividades vienen condicionadas por la llegada del próximo buque al puerto, ya que será este siguiente el que definirá la ventana temporal de que disponen los operarios de la terminal para realizar las actividades de inspección y liberación de espacio en el buffer de descarga. Estas dos actividades están unidas por el subsistema de interconexión, que en este caso une los subsistemas de descarga y almacenaje.

Una vez aparcados los vehículos y conocida la ubicación exacta de todos los vehículos de la campa, se realizan los correspondientes pedidos por parte de los clientes o concesionarios. Cuando esta orden llega al operador logístico, este realiza la actividad de retirada de vehículos de la campa y colocación en el buffer PDI (*Pre-Delivery Inspection*), donde se realizarán las actividades de valor añadido para el vehículo, así como una inspección técnica del mismo. La ventana temporal que rige esta actividad viene dada por el cumplimiento en el plazo de entrega del vehículo a la llegada a la terminal del modo de transporte que realizará la entrega final, ya sea por carretera o ferrocarril. En esta ventana temporal deben incluirse los tiempos de retirada de la campa y actividades en el PDI. Por último, una vez ha llegado a la terminal el tráiler o tren que retirará los vehículos de la terminal portuaria, este debe ser cargado en el mínimo tiempo posible, ya que al igual que sucede con los buques, estos consiguen su productividad en movimiento, siendo sus estancias en la terminal portuaria símbolo de inactividad.

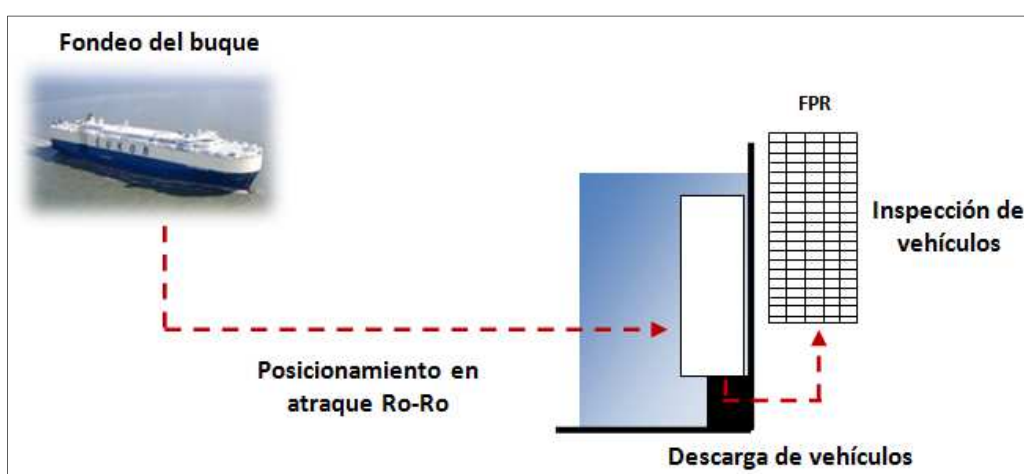
A continuación, se profundizará en cada uno de los subsistemas que se han presentado de manera cronológica en la figura 4.1, para descubrir cuáles son las



actividades y tareas más significativas de cada uno de ellos. Serán una vez analizados estos subprocesos, que se podrá realizar una primera aproximación de cuáles son los que más influyen en el desarrollo del proceso de importación y a los que se debe prestar un mayor interés *a posteriori*.

### **Subsistema de descarga**

El primer subsistema del proceso de importación se resume como la descarga de los vehículos de los buques que llegan a puerto. Dentro de este subsistema, se suceden una serie de procesos, tal y como se observa en la figura 4.2, que se estudiarán detalladamente.



**Figura 4.2** - Esquema de procesos en el subsistema de descarga

#### **Fondeo del buque**

La zona de fondeo o rada de un puerto se define como el área administrativa perteneciente al mismo puerto donde el buque puede echar el ancla antes de atracar en él, debido a falta de espacio en su interior. Para la modelización de las llegadas de los buques al puerto se supone un tiempo de fondeo medio ( $t_f$ ) conocido. Este tiempo pretende ser el mínimo posible, ya que de esta forma se quiere reducir al máximo el tiempo desde su llegada hasta la descarga física de los vehículos en el muelle.

#### **Posicionamiento del buque en el atraque Ro-Ro**

Una vez el buque traspasa la bocana del puerto y entra físicamente en el puerto, transcurre un tiempo determinado hasta que se posiciona en el atraque que le corresponde y arma las rampas Ro-Ro. Si se obtienen estos tiempos de posicionamiento para varios buques en el mismo atraque de un puerto se observa que su variación es mínima, por lo que se tomará como válido un valor fijo de tiempo de posicionamiento ( $t_p$ ).



### Descarga de los vehículos

Una de las actividades más importantes en el subsistema de descarga es la propia descarga de los vehículos del buque a la terminal. Cuando el barco ha armado la rampa Ro-Ro, se puede proceder a la descarga de los vehículos que deben almacenarse en la terminal portuaria. El almacenaje de los vehículos en el interior del buque se puede realizar siguiendo tres estrategias distintas que, a su vez, condicionarán la descarga de estos. Tal y como propone Gil (2007), se usarán las estrategias de *flow stow*, *head in* y *head out*.

- **Flow stow:** Aparcamiento de los vehículos en las galerías del buque perpendicularmente al sentido de la rampa de descarga. Con esta estrategia se consiguen reducir las maniobras durante la descarga pero se desaprovecha espacio en el interior del buque.
- **Head in:** Consiste en la carga de los vehículos de cara, para descargarlos marcha atrás posteriormente. Con esta estrategia se consigue una utilización óptima del espacio, penalizando el tiempo de descarga, que se verá aumentado.
- **Head out:** Consiste en la carga de los vehículos marcha atrás para descargarlos de cara. Así se consigue tanto una optimización del espacio en la galería del buque, como un tiempo de descarga mínimo. Por el contrario, el proceso que se penalizará con esta estrategia será la exportación, ya que la carga de los vehículos se realizará marcha atrás.

Para modelar el subproceso de descarga de los vehículos es necesario entender que se trata de un modelo de teoría de colas, donde las llegadas se caracterizan por el número de vehículos a descargar y el ritmo de servicio vendrá dado por la productividad del operador logístico. En este sentido, se deberá definir un tiempo medio de espera en el interior del buque ( $\bar{t}_b$ ) para los vehículos que deben ser servidos, así como un tiempo de desplazamiento medio entre el interior del buque y el buffer FPR ( $t_{bb}$ ).

Es importante enunciar que las llegadas de los vehículos se toman como llegadas en masa o *bulk arrivals*, ya que al tratarse de la descarga de un buque, todos los vehículos a ser servidos ya se encuentran en el interior del buque. Para definir el pendiente de la recta del ritmo de servicio, debe conocerse previamente la productividad de cada conductor ( $p_i$ ) para una terminal específica (atendiendo a factores de organización, rendimiento del personal, etc.) y el número de conductores que realizarán las tareas de descarga de un buque ( $c$ ). A partir de aquí se puede obtener la productividad ( $p_c$ ) de la pandilla de conductores para una descarga en términos de vehículos descargados / unidad de tiempo.

$$p_c = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{c} \cdot c \quad (4.1)$$



### Inspección de los vehículos

Cuando el proceso de descarga del último vehículo culmina, empieza la correspondiente inspección de los vehículos antes de ser introducidos en la campa de almacenaje. Esta inspección se suele realizar en el buffer de descarga, donde han sido aparcados los vehículos y que suele situarse en una zona muy cercana al muelle. Cuando todos los vehículos ya han sido descargados, el buque puede realizar los trámites administrativos para abandonar el puerto. Seguidamente, con la retirada de las rampas Ro-Ro utilizadas para la descarga, el buque puede iniciar las maniobras para partir del puerto. De esta manera, el subproceso de inspección de los vehículos ya no viene condicionado por la ventana temporal del buque del cual han sido descargados los vehículos, sino que influye la llegada del siguiente buque.

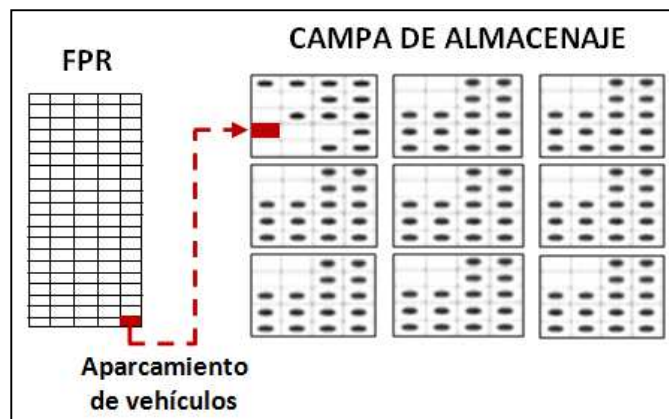
Dentro de este subproceso de inspección, existen dos tiempos que influirán en su definición. El primero de ellos será el tiempo medio de espera de servicio ( $\bar{t}_s$ ). Junto con este tiempo de espera cabe definir el tiempo empleado en la inspección o tiempo de servicio ( $t_{ss}$ ), que se tomará como el inverso de la productividad de los operarios en la inspección ( $q_s$ ).

El subproceso de inspección de vehículos en el buffer FPR sigue la teoría de colas, y más concretamente se rige por una disciplina FCFS (First Come First Served). Es decir, el primer vehículo que es descargado en el buffer, será el primero que se inspeccionará y se dirigirá hacia la campa de almacenaje. El ritmo de llegada de los vehículos a la zona de inspección viene impuesto por la productividad de los conductores anteriormente analizada ( $p_c$ ), mientras que el ritmo de inspección y salida del buffer es el anteriormente comentado  $q_s$ . Cuando un vehículo “i” llega a la zona de inspección, transcurre un cierto tiempo hasta que no se le hace la correspondiente verificación.

### **Subsistema de interconexión descarga – almacenaje**

Tal y como sucede en el subproceso de inspección de los vehículos dentro del subsistema de descarga, el subsistema de interconexión también tiene como ventana temporal de restricción la llegada del siguiente buque al muelle. El movimiento de los vehículos del buffer FPR hasta la campa de almacenaje debe realizarse en un tiempo inferior al que existe entre la salida del buque que ha descargado los vehículos y la llegada del siguiente, que también necesitará del espacio de descarga inicial FPR.

El subsistema de interconexión únicamente viene influido por el subproceso de aparcamiento de los vehículos en la campa de almacenaje donde permanecerán los vehículos durante una ventana temporal indefinida, tal y como se muestra en el esquema de la figura 4.3.



**Figura 4.3** - Esquema del subsistema de interconexión

El estudio de este subsistema es de vital importancia debido al elevado número de parámetros que influyen en la decisión de aparcamiento. La importancia de la acción de aparcar los vehículos en la cama de almacenaje radica en la complejidad de la misma. Las decisiones que se tomen influirán en los costes de explotación de la terminal por parte del operador logístico, pudiendo obtener unos ahorros importantes si las decisiones tomadas son las acertadas o unos sobrecostes que pueden hacer poco rentable el negocio. Dos de las decisiones más importantes que deben tomarse en el subsistema son el lugar de ubicación de un grupo de vehículos importados en la cama de almacenaje y el número de conductores que realizarán tal tarea. Estas decisiones se verán afectadas no solo por las restricciones temporales antes impuestas, sino también por la distancia de aparcamiento y el tiempo que ello conlleva, las rutas escogidas para la ubicación en el aparcamiento, así como los conductores disponibles en un turno determinado.

A continuación se estudiará detalladamente los parámetros influyentes en la decisión de ubicación de un vehículo en la cama de almacenaje, y que se utilizará en el siguiente capítulo para modelar la eficiente ubicación de los mismos, reduciendo los costes asociados.

Tal y como sucedía con los otros procesos estudiados a lo largo de los subsistemas anteriores, la estrategia seguida para la incorporación de los vehículos en el interior de la cama es la de FCFS (*First Come First Served*). De esta manera, se consigue reducir al mínimo el tiempo de liberación del buffer de descarga, con lo que se cumplirá la restricción impuesta por la ventana temporal de llegada del siguiente buque a puerto.

Partiendo de la situación extrema de mínima ventana temporal, pueden existir distintas estrategias con una menor restricción temporal debido a que la llegada del siguiente buque no se produce en el mínimo tiempo posterior. De esta manera, se pueden estudiar estrategias que resulten más adecuadas para el operador logístico en lo que a la productividad de los conductores ( $p_c$ ) se refiere. Estas estrategias de restricción temporal se estudiarán a continuación y pretenden ser los parámetros del modelo que se introducirá en el próximo capítulo del estudio referente a la toma de





decisiones de aparcamiento de vehículos en una campa de almacenaje que reduzca el número de recolocaciones a realizar.

Son muchos los parámetros que influyen en la productividad de un operador logístico para aparcar los vehículos en la campa, pero se ha intentado agruparlos en dos tipos de parámetros de decisión claramente diferenciados para facilitar su estudio (Mattfeld y Orth, 2006). Con eso, la **asignación del aparcamiento** en la campa de almacenaje se presenta como un primer parámetro a valorar en la medición de la productividad. Este parámetro se ve influido por decisiones como la distancia entre el punto de descarga y el aparcamiento final, la ruta escogida para trasladarlo, la agrupación de los vehículos para facilitar la vuelta de los conductores al punto de descarga, etc. Como segundo parámetro prioritario se destaca la **disponibilidad de mano de obra**. En este segundo parámetro influyen decisiones como cuántos conductores emplear para una tarea en concreto, en qué turno colocar mayor número de conductores, qué estrategia de aparcamiento se debe utilizar, entre otras variables de decisión.

### **Subsistema de almacenaje**

Cuando todo el grupo de vehículos ha sido incorporado en la campa, éste entra a formar parte del subsistema de almacenaje. Una vez allí, los vehículos seguirán actuando como grupo compacto para facilitar la optimización de las operaciones que en este subsistema se puedan llevar a cabo. Algunas de las decisiones de suma importancia que deben tomarse en este subsistema son la **recolocación de los vehículos** dentro de la propia campa para liberar espacios suficientemente grandes para poder aparcar a los vehículos que esperan en el buffer. Esta incorporación de nuevos grupos de vehículos debe realizarse de manera compacta para conseguir una productividad máxima del grupo de conductores que desarrollen la tarea.

Para estudiar detalladamente los criterios de recolocación, debe estudiarse previamente la distribución en planta de la campa de almacenaje. Esta distribución del espacio se puede dividir en dos aproximaciones correlacionadas. La primera será a nivel macroscópico donde se estudiará la accesibilidad de la campa en planta y en la cual se propondrá una división de la campa de almacenaje en áreas de tamaño menor llamados bloques. La segunda será a nivel microscópico y estudiará las plazas de aparcamientos de los vehículos y su distribución dentro de los bloques para obtener la forma en planta que mayor productividad obtenga a la hora de aparcar y retirar los vehículos.

### **División en planta de la campa de almacenaje**

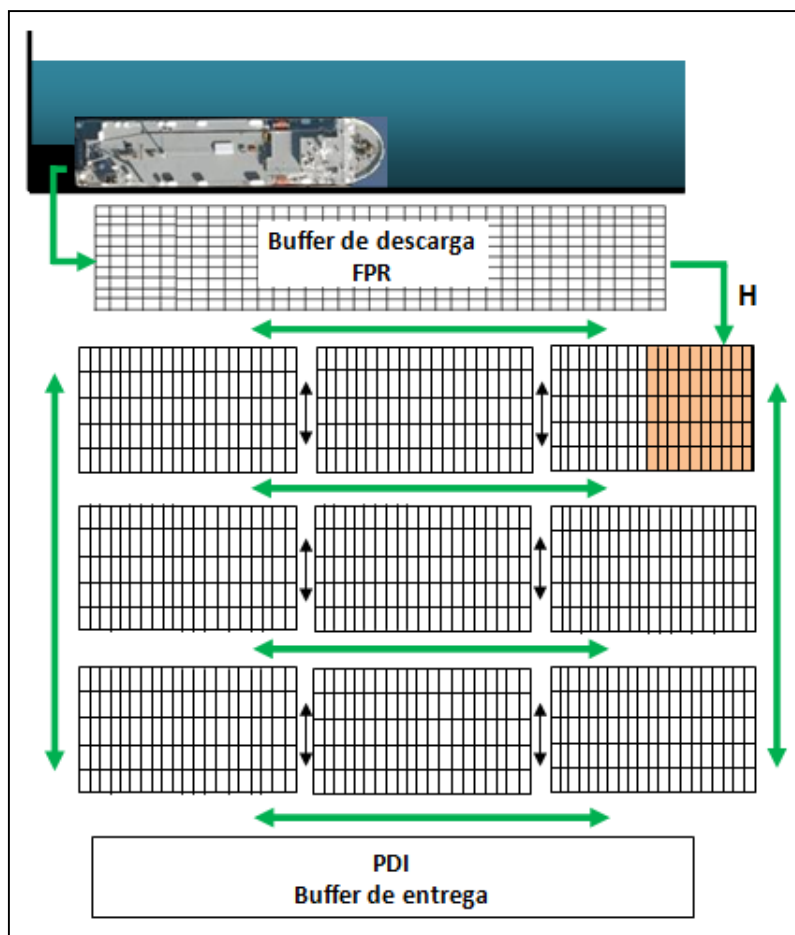
Una terminal portuaria de vehículos está sometida a unas restricciones de espacio importantes debido a que se encuentra dentro de un puerto, donde el espacio es muy valorado, y tiene grandes necesidades de área para almacenar los vehículos. En ocasiones, estas extensas áreas se sitúan alejadas de la zona de descarga, hecho que repercute en una disminución de la eficiencia del operador logístico y capacidad de gestionar sus vehículos con rapidez.



La mayoría de terminales portuarias de vehículos disponen de una distribución en planta similar, donde se puede diferenciar claramente la zona habilitada para el amarre de los buques, el buffer de descarga, la zona de almacenaje, la zona de entrega, el buffer de carga para trenes y tráileres, así como los puntos de transferencia entre zonas y las rutas utilizadas para ello. El tipo de vehículos que una terminal puede albergar también definirán la planta de la campa de almacenaje, adaptándose a las necesidades de los clientes.

El estudio realizado para obtener la partición óptima del espacio de la campa de almacenaje debe ser de vital importancia para el operador logístico. Esta división permitirá en un futuro una toma de decisiones más sencilla y adecuada para la asignación de aparcamiento de un grupo de vehículos, así como de las recolocaciones que se deban realizar. Varios han sido los estudios realizados para determinar las particiones de espacio óptimas para bloques de contenedores, pero esta investigación ha obviado a las terminales de vehículos. Kim y Kim (2002) pretendían encontrar el volumen óptimo de una terminal y proponían un modelo de costes para la toma de decisiones. Este modelo de costes incorporaba los parámetros del coste del espacio, de la inversión necesaria en maquinaria y de las operaciones de transferencia de contenedores entre la zona de almacenaje y los camiones. El modelo de costes en cuestión se analizó en dos escenarios distintos donde el primero pretendía minimizar los costes de operación para la terminal, y el segundo los costes de operación globales tanto para el operador como para los clientes. Más adelante, Kim, et al. (2003) pretendieron refinar este modelo de costes tratando de optimizar la medida óptima de un bloque de contenedores. El estudio proponía dos métodos para la optimización de tal unidad de división en planta de la terminal. El primero definía una distribución paralela al muelle, mientras que el segundo ubicaba los bloques perpendicularmente al muelle. Para realizar la división de la campa de almacenaje de vehículos en bloques y la obtención de su tamaño óptimo utilizaremos la base de estos dos modelos propuestos anteriormente y argumentos propuestos por otros autores como Yang y Kim (2006) y Hong y Kim (2006).

Se consideraran dos tipos de división en planta de la campa de almacenaje en función de la orientación que tengan los bloques de vehículos respecto al muelle de descarga. En una misma terminal de vehículos pueden coexistir ambas distribuciones en planta, ya que sus características pueden favorecer más a un tipo de procesos que a otros, haciendo que no haya una única solución óptima para la distribución en planta. El primer esquema en planta se caracteriza por aparcar los vehículos de manera perpendicular al muelle de descarga. (Figura 4.4)



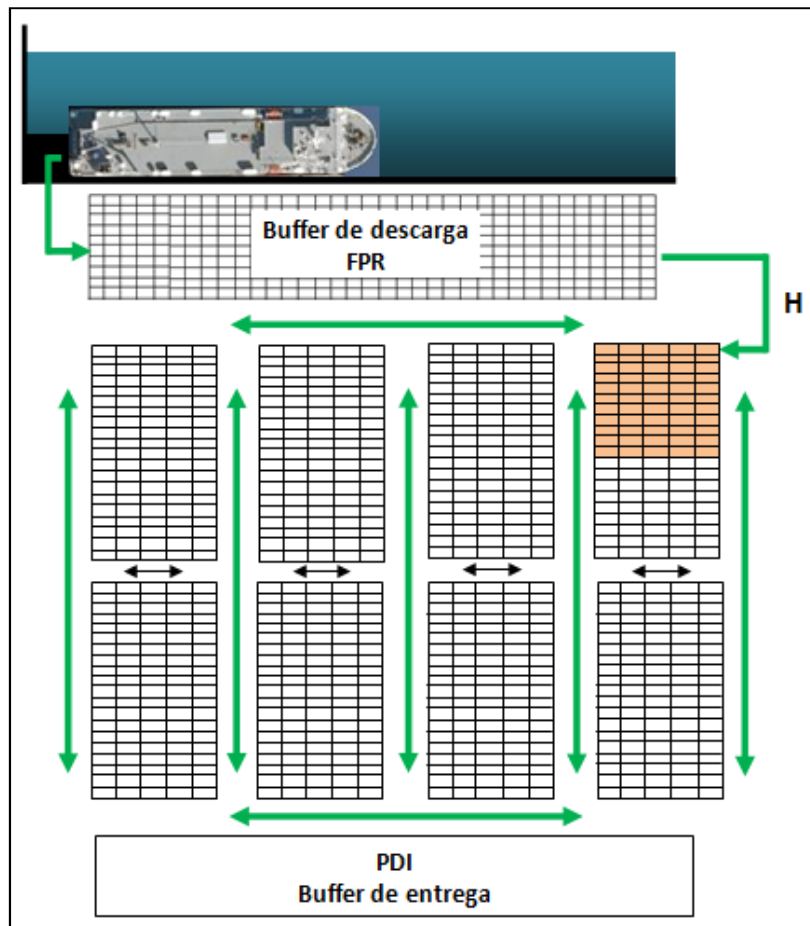
**Figura 4.4** - Esquema de la distribución en planta de la cama de almacenaje con los aparcamientos perpendiculares al muelle de descarga

Esta distribución obliga a que las rutas de acceso principales a los bloques sean paralelas al muelle. Cada bloque de aparcamiento estará formado por varias celdas de aparcamiento, celdas en donde se incorporarán cada uno de los grupos de vehículos que se encuentren en el buffer de descarga (FPR). Cabe recordar, que la variabilidad del número de vehículos descargados para cada buque puede influir de manera substancial en la definición de los bloques de aparcamiento. De esta manera, en este estudio se ha tomado un valor fijo medio de vehículos descargados que coincidirá con las plazas de aparcamiento para cada celda, como simplificación del problema a estudiar.

En esta distribución, la longitud horizontal de los bloques será superior a la vertical. Estas medidas variarán en función de cuales sean los parámetros a optimizar. Con esta distribución se asegura la incorporación de los vehículos en la cama de almacenaje en el mínimo tiempo posible, ya que las maniobras a realizar por parte de los conductores para el aparcamiento son mínimas si se dispone de una ventana temporal restrictiva. Sin embargo, esta distribución penaliza el aparcamiento cuando no existen restricciones temporales, ya que se priorizan estrategias de aparcamiento más lejanas del muelle, hecho que implica un mayor desplazamiento de los vehículos dentro de la cama. Este esquema, al disponer de vías principales horizontales penalizará la productividad total de los conductores, que realizarán los trayectos con un tiempo superior.



El segundo esquema en planta propuesto plantea disponer las plazas de aparcamiento paralelas al muelle de descarga (figura 4.5). Esta distribución plantea longitudes verticales superiores a las horizontales, y prioriza las estrategias de almacenamiento de vehículos a distancias grandes del muelle debido a que las rutas principales de acceso a los bloques también son perpendiculares al muelle.



**Figura 4.5** - Esquema de la distribución en planta de la cama de almacenaje con los aparcamientos paralelos al muelle de descarga

Al contrario de lo que sucedía con la primera distribución, este esquema no garantiza la incorporación de los vehículos a la cama en el menor tiempo posible debido a las maniobras a realizar, hecho que penaliza este esquema cuando las ventanas temporales son muy restrictivas. Por el contrario, al disponer de vías principales perpendiculares al muelle, realizará las incorporaciones a la cama de almacenaje de manera más productiva cuando se desee asignar una posición de aparcamiento en la cama alejada del buffer de descarga.

Para el diseño de la cama de almacenaje tipo, que será analizada en los capítulos posteriores, se intentará conseguir una distribución en planta que garantice una rápida incorporación de los vehículos, tanto cerca como lejos del muelle de descarga. Así, será necesario disponer de rutas de acceso a los bloques tanto paralelas como perpendiculares al muelle, siendo los bloques de forma cuadrada o parecida los que mayor accesibilidad aportarán a la cama de almacenaje para las actividades de incorporación o recolocación.



### Distribución de un bloque en planta

Como se ha visto anteriormente, la distribución en planta de los vehículos por bloques exige de una definición previa de cuáles son las estrategias y los objetivos que persigue el operador logístico. Cabe recordar, que en este análisis solo se evalúan las posibilidades del proceso de importación, restando el proceso de exportación por analizar, ya que la distribución en planta para este segundo proceso varía considerablemente del primero.

En el proceso de importación, los vehículos son almacenados en la campa en grupos compactos de vehículos. Para la retirada de la campa, estos vehículos se agrupan en el buffer de entrega donde son compactados de nuevo para facilitar la entrega. Si la entrega de vehículos al cliente no comprende el conjunto entero de vehículos en una celda de vehículos, como suele suceder, los vehículos restantes se verán sujetos a recolocaciones para poder obtener los vehículos que sí se desean entregar. Se debe entender que la llegada estocástica de las órdenes de entrega a clientes no permite anticipar estas recolocaciones para mantener el grupo compacto. Para adaptar de la mejor manera posible los aparcamientos de la campa a estos procesos de retirada estocástica. Mattfeld (2006) propuso diferenciar dos estrategias de aparcamiento de los vehículos en los bloques y estudiar sus virtudes y limitaciones.

Las dos estrategias parten de la hipótesis de incorporar todo el grupo compacto de vehículos en el mismo espacio de almacenamiento, facilitando así el trabajo de los conductores que deben ser recogidos cada vez que realizan un aparcamiento dentro de la campa, mejorando la productividad que pueden ofrecer al aumentar el número de vehículos movidos por unidad de tiempo.

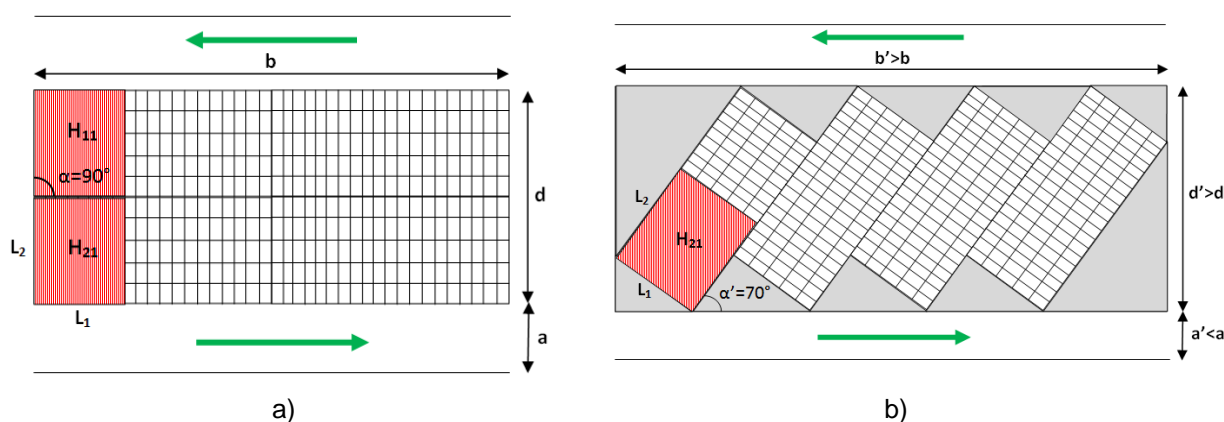
La **primera estrategia** se basa en la idea de **procesar los vehículos por lotes**, dividiendo los bloques en celdas rectangulares de área  $H$ , el número de vehículos por celda. El número de columnas de vehículos de la celda en cuestión  $L_1$ , y el número de filas de vehículos  $L_2$ , vendrán determinadas por el operador logístico, sabiendo que a menor anchura (disminución de  $L_1$ ) aumentará la utilización del espacio de almacenamiento, pero a su vez aumentará el ratio de recolocaciones a realizar y, por consiguiente, de desperfectos en los vehículos almacenados. Esta estrategia de aparcamiento en filas hace que solo el primer y último vehículo de cada fila sean directamente accesibles. Iranpour y Tung (1989) concluyeron que un incremento de  $n$  vehículos en una fila de una celda, suponía una disminución de la accesibilidad de  $2/n$ , debiendo ser movidos  $(n-2)/4$  vehículos previamente antes de llegar al vehículo que debe ser conducido hasta el buffer de entrega.

$$H = L_1 \cdot L_2 \quad (4.1)$$

La **segunda estrategia** se centra en optimizar el espacio utilizado para el almacenaje atendiendo a la **retirada estocástica de los vehículos de la campa**. Al igual que en la primera estrategia también se propone un tratamiento compacto del grupo de vehículos, pero difiere en la distribución en planta de las celdas de aparcamiento. Estos bloques pretenden almacenar celdas trapezoidales de área  $H$ , el número de vehículos descargados. Esto supone un giro de un ángulo  $\alpha'$  respecto a la



horizontal menor al ángulo de  $\alpha=90^\circ$  propuesto para la primera estrategia. Con esta estrategia, si bien es cierto que aparecen espacios inutilizados en las esquinas del bloque rectangular, también lo es la reducción del espacio necesario para los pasillos de sentido único de acceso al mismo (se pasa de una anchura  $a$ , a una anchura  $a' < a$ ), ya que el giro que deben realizar los vehículos se ve reducido a un giro de longitud de circunferencia menor. Esta disminución en el giro no solo reduce la anchura del pasillo de acceso, sino que también lo hace con el ratio de desperfectos que se producen en los vehículos. Es por esto que la definición en planta de estas celdas supone un *trade-off* entre las longitudes de la celda y la anchura de los carriles de acceso. Bingle, et al. (1987) probó que existe un ángulo  $\alpha'$  óptimo cercano a los  $70^\circ$  para el diseño de las celdas de aparcamiento que se rigen por la retirada estocástica de los vehículos, teniendo en cuenta que para la retirada del vehículo el ángulo que se deberá realizar será de  $110^\circ$ , siendo este menos penalizador y restrictivo. (Figura 4.6)



**Figura 4.6** - Esquema en planta de un bloque rectangular con dos celdas de vehículos en posición vertical (a) y con dos celdas giradas un ángulo  $\alpha'=70^\circ$  respecto a la horizontal.

(Fuente: Mattfeld, 2006)

De las dos estrategias de definición de celdas de aparcamiento deberemos definir cuál de las dos es la más adecuada a las necesidades operacionales de la cama. Así, aquellas zonas de la cama que deban ser operadas con grupos compactos de vehículos (como sucede con los vehículos de importación) deberán adoptar la primera estrategia de almacenamiento, utilizando celdas rectangulares con un ángulo  $\alpha=90^\circ$ . Por contrario, para los procesos de entrega de vehículos por vía terrestre se recomienda disponer de celdas trapezoidales con un ángulo respecto a la horizontal de  $70^\circ$  aproximadamente.

### **Subsistema de interconexión almacenaje – entrega**

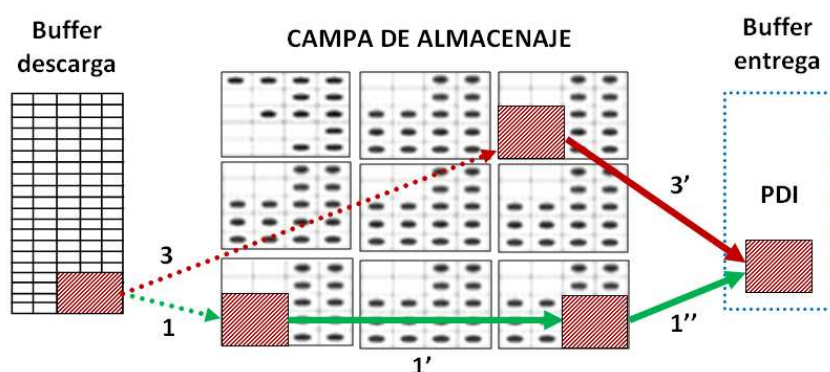
Cuando la orden de entrega de vehículos llega al operador logístico como máximo con una antelación de 15 días, este debe ser capaz de planificar cuál será la estrategia más eficiente y que consuma menor número de recursos. A ello se refiere una óptima utilización del personal disponible, intentando evitar una contratación extra de conductores para realizar tal proceso de movimiento de vehículos. Como se ha comentado, esta orden de entrega es estocástica, con lo que es imposible programar





estas operaciones de entrega con un tiempo anterior a la orden recibida. En el plazo dado, el operador logístico debe consolidar el grupo de vehículos que serán retirados por vía terrestre (por carretera o ferrocarril) en el PDI, y allí ultimar las actividades de valor añadido detalladas por parte del cliente.

La consolidación del grupo de vehículos que debe ser entregado puede hacer variar considerablemente la productividad del grupo de conductores dependiendo de la estrategia de asignación de aparcamiento escogida en la incorporación a la campa de los vehículos a su llegada al muelle. Esta productividad también puede venir supeditada por la posible recolocación que haya sufrido un paquete de vehículos que debe ser entregado, alterando la estrategia que inicialmente se había escogido como la más eficiente y de mayor productividad. Estas recolocaciones *a priori* deben beneficiar el subsistema de interconexión aquí estudiado ya que tienden a alejar los vehículos de las zonas de aparcamiento más cercanas al muelle. Estas zonas que se utilizan para almacenamientos cercanos al muelle (tipo 1) deben ser utilizadas para almacenar vehículos con ventanas temporales muy restrictivas, hecho por el cual deben siempre disponer de un número importante de plazas de aparcamiento para posibles descargas urgentes. Es por esto que, si bien es cierto que las recolocaciones suponen una ineficiencia para el operador logístico en la planificación de las actividades y turnos de los conductores, éstas colaboran a aumentar la productividad de los conductores para la consolidación de los vehículos en el PDI (figura 4.7).



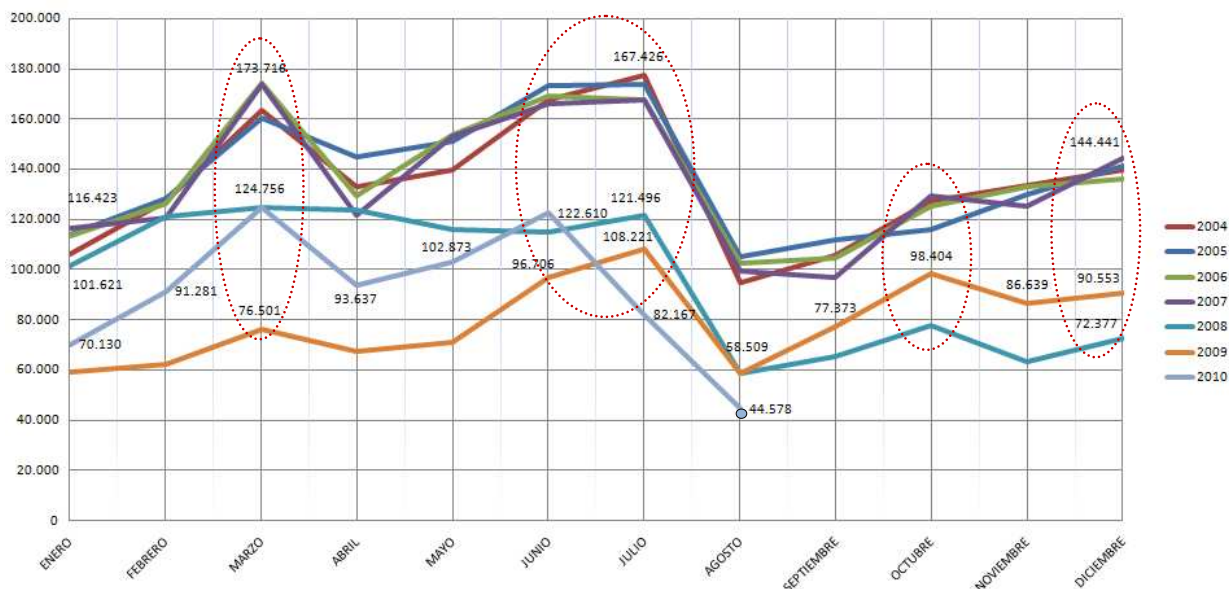
**Figura 4.7** - Esquema en planta de las estrategias de asignación de aparcamiento con recolocación de vehículos (1-1') y de entrega directa sin recolocación (3)

### Modelización de las estrategias de planificación

Aunque la demanda de vehículos por parte de los clientes es estocástica y difícil de modelar, se puede conocer en qué épocas del año la terminal portuaria realiza mayor número de desplazamientos analizando las ventas de automóviles del mercado. Relacionando estas matriculaciones con el volumen de movimiento de la terminal, el operador logístico de la terminal tendrá una herramienta más para saber cuándo se realizan mayor número de operaciones de entrega, con lo que se podrá conocer previamente las necesidades de personal y la definición de la estrategia de ubicación y retirada de vehículos más eficiente para él. Para tal fin, se debe realizar un análisis exhaustivo del mercado del automóvil a nivel nacional, mercado que en los



dos últimos años ha sufrido un importante descenso en el número de matriculaciones (disminución del 45% en el período 2007-2009. Fuente: ANFAC) debido en buena parte a la coyuntura global de la economía que también ha afectado al sector. Cabe recordar que cada terminal portuaria opera únicamente con un número de marcas de automóviles reducido, pudiéndose detallar este análisis aún más si el operador dispone de la información necesaria para tal.



**Figura 4.8** - Matriculaciones mensuales en España durante el período Enero 2004 – Agosto 2010, marcando en círculos las épocas de mayor demanda. (Fuente: ANFAC)

Como muestra el gráfico de la figura 4.8, se observa que existen 5 meses al año donde las operaciones de entrega serán más importantes. Éstos son Marzo, Junio, Julio, Octubre y Diciembre, que se agrupan en periodos mensuales o bimensuales que equidistan temporalmente en el año, asimilándose a las cuatro estaciones del año. Luego para estas épocas deberá definirse una estrategia de operación que priorice la entrega de vehículos al buffer PDI y que reduzca los tiempos de consolidación.

### Subsistema de entrega

Para la salida de los vehículos de la terminal portuaria se debe disponer de un buffer de entrega donde el modo de transporte escogido para entregar el vehículo pueda estacionar durante la carga de los vehículos. Igual como sucedía con la descarga de los buques, se pretende que el vehículo transportador, ya sean tráileres o trenes, estén el mínimo tiempo posible en el buffer de entrega para reducir sus costes de explotación. Así es que, cuando se recibe la orden de entrega y se conoce el día de recogida de vehículos, éstos ya deben haber sido inspeccionados en el PDI y se les deben haber colocado los complementos técnicos que impuso el cliente, restando únicamente el visto bueno del transportista por realizarse. En este momento, empieza la carga de los vehículos por parte de los conductores en los correspondientes tráileres o vagones de tren, de los cuáles se deben conocer las características





técnicas necesarias para realizar una entrega con un ratio de desperfectos mínimo. En este subsistema se verán implicados los subprocesos de inspección de pre-entrega (PDI) y actividades de valor añadido, así como la carga en sí de los vehículos.

#### Inspección de pre-entrega y actividades de valor añadido

Dentro de este subproceso de inspección, existen dos tiempos que influirán en su definición. El primero de ellos será el tiempo medio de espera para la inspección de pre-entrega, seguido del tiempo empleado para la inspección de los vehículos en sí. Cabe recordar, que buena parte del beneficio obtenido por los operadores logísticos reside en la realización de estas actividades de valor añadido, que adaptan el vehículo a las necesidades del cliente y hacen que la terminal sea responsable de buena parte de los acabados del mismo.

El tiempo empleado en la inspección o tiempo de servicio será la media de tiempos utilizados en la inspección de cada vehículo. Para expresarlo matemáticamente, se utilizará la expresión del inverso de la productividad de los operarios que intervienen en el proceso de inspección de pre-entrega, así como de instalación de los complementos que se les tengan que añadir a los vehículos.

#### Carga de los vehículos

Para modelar el subproceso de carga de los vehículos en la terminal de entrega donde esperan principalmente tráileres para hacer el intercambio modal y llegar al cliente, es necesario entender que se trata de un modelo de teoría de colas.

En este modelo se caracterizan el número de vehículos a cargar y el ritmo de servicio de carga definido como la productividad  $p_c'''$ . Para facilitar la modelización del proceso de carga, se asumirá que todos los vehículos ya han sido inspeccionados y se les ha colocado todos los acabados necesarios para ser cargados, por lo que su curva de llegadas será representada por una recta vertical. Se definirá un tiempo medio de espera en el buffer de entrega ( $\bar{t}_e$ ) para los vehículos que deben ser cargados, así como un tiempo de desplazamiento medio entre el buffer de entrega y el modo de transporte ( $t_{ee}$ ).

## **CAPÍTULO 5**

---

### **MODELIZACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DE VEHÍCULOS**



## 5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se tratará de dotar al operador logístico de las herramientas necesarias para la correcta toma de decisiones en lo que aparcamiento de vehículos en la terminal se refiere. La definición de las operaciones que se suceden en cada uno de los distintos subsistemas que conforman el proceso de importación, y que se han expuesto de manera detallada en el capítulo anterior, debe ser el punto de partida para identificar detalladamente cuáles son los parámetros decisivos en el aparcamiento de los vehículos en la campa de almacenaje. De bien seguro, la correcta identificación del problema repercutirá en la mejora de la eficiencia de las operaciones realizadas. Para su estudio se propondrá una Modelización de la Localización de Vehículos (MLV), que aportará al operador logístico los mecanismos de decisión para una óptima estrategia de aparcamiento de los vehículos a su llegada a la terminal por vía marítima.

La modelización debe tratar los aspectos influyentes en la localización y aparcamiento de los vehículos en la campa de almacenaje, centrando el estudio en aquellos parámetros que se vean mayormente influenciados por esta toma de decisiones. El primer apartado tratará las consideraciones previas a la modelización, para definir claramente cuáles son las hipótesis que se han realizado para una terminal estándar de vehículos. Seguidamente, se presentarán tanto los diseños de celdas como de bloques de forma genérica, que posteriormente utilizarán las estrategias de localización en la terminal. Por último, se enumeran los parámetros de decisión utilizados para definir cuál de las estrategias de aparcamiento será la óptima para la terminal. La evaluación de estos parámetros será abordada en el próximo capítulo.

## 5.2 CONSIDERACIONES PREVIAS A LA MODELIZACIÓN

Una vez los buques han descargado un grupo de vehículos en el buffer de descarga del puerto, estos deben ser introducidos en la campa de almacenaje de tal manera que cumplan con los condiciones de aparcamiento que el operador logístico ha establecido para el óptimo funcionamiento de la terminal, así como las restricciones temporales impuestas por la llegada del siguiente buque.

Para realizar la comparación de las distintas estrategias de aparcamiento de que dispone el operador logístico, deben considerarse una serie de hipótesis para la modelización de la localización de vehículos. Solamente de esta manera será posible la comparativa entre las distintas estrategias de aparcamiento que se propondrán. En esta definición, se asumirán los siguientes supuestos:

- La llegada de los buques al puerto es aleatoria y se puede considerar que sigue una distribución de Poisson, con parámetro  $\lambda$  (buques/día). Este supuesto se ha realizado basándose en la literatura de simulación disponible, que suele utilizar esta distribución para simular las llegadas de buques (Plumee, 1966). El parámetro de llegadas ( $\lambda$ ) se escogerá según cuál sea el nivel operacional de la terminal. Sin embargo, se considerará que el intervalo



de tiempo entre llegadas de buques ( $\Delta t$ ) se mantendrá constante, para facilitar de esta manera la asignación del aparcamiento y las unidades de mano de obra para la realización de las tareas de incorporación de vehículos a la campa de almacenaje.

- Se considera que el tiempo de espera de los buques en la zona de fondeo del puerto es nula, ya que el operador logístico dispone de suficientes puestos de atraque para servir a todos los buques que lleguen al puerto en cualquier momento.
- Las llegadas de los buques de manera aleatoria ( $K = \{1, 2, \dots, m\}$ ) supone la llegada a puerto de un batallón constante de vehículos que debe ser atendido por la mano de obra disponible. Se supondrá que para cada  $k$ -llegada se le corresponde una tarea de descarga y aparcamiento del mismo número de vehículos ( $n$ ) para simplificar el análisis de las estrategias. Asimismo, el diseño de las celdas se verá beneficiado de esta simplificación al disponer cada una de ellas de la misma capacidad e igual a  $n$ .
- Las tareas de descarga e incorporación de los vehículos a la campa de almacenaje se realizarán por grupos de igual número de conductores, que conformarán una unidad de mano de obra. La productividad de las operaciones de descarga de los vehículos de los buques ( $p_c$ ) vendrá dada por una distribución uniforme entre dos valores preestablecidos, mientras que la productividad de las operaciones de aparcamiento ( $p_c'$ ) vendrá dada por los valores calculados según la distancia al punto de aparcamiento.
- La disciplina de servicio en la cola de espera en el buffer de descarga es FCFS (*First Come First Served*). Es decir, el primer vehículo del grupo de vehículos que llega al buffer, será el primero que será aparcado en el interior de la campa de almacenaje.
- La retirada de los vehículos de la campa de almacenaje también responde a una variable aleatoria, ya que se desconocen con antelación los pedidos hechos por los clientes. Es por esto que el ritmo de salida de los vehículos de la campa sigue una distribución exponencial de parámetro  $\mu$  (vehículos/día) que podrá variar según el nivel operacional que se tenga en la terminal.

### 5.3 DISEÑO EN PLANTA DE LAS CELDAS DE APARCAMIENTO

Para definir el modelo óptimo que se utilizará para la localización de vehículos en el interior de la campa de almacenaje se presenta a continuación el diseño en planta de las celdas de aparcamiento. En todos los diseños considerados, las celdas albergan  $n$  vehículos, tal y como se ha considerado en las hipótesis iniciales. Así, se definirán distintos valores para el número de vehículos por columnas ( $L_1$ ) y por filas ( $L_2$ ) que conformarán la superficie rectangular donde se ubicarán los vehículos a almacenar en la campa.

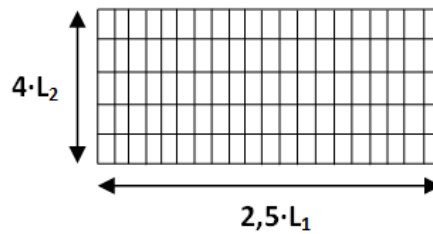


$$n = L_1 \cdot L_2 \quad (5.1)$$

El producto entre el número de vehículos por fila y el número de vehículos por columna nos dará el número total de vehículos ( $n$ ) para la cual se han diseñado las celdas, después de realizar la observación de varias descargas de vehículos en el puerto.

Para analizar los distintos diseños en planta se define el parámetro de forma  $\beta$ . Las hipótesis presentadas en el inicio de este capítulo que determinan que cada buque descarga un número constante de vehículos igual a  $n$ ,  $n \in \mathbb{N}$ , facilitarán la distribución en planta de la campa de almacenaje, que se estructurará en celdas de  $n$  vehículos. En este sentido, el parámetro de forma se define como el cociente entre el número de vehículos por columna ( $L_1$ ) y el número de vehículos por fila ( $L_2$ ):

$$\beta = \frac{L_1}{L_2} = \frac{n}{L_2^2}, \quad \beta \in (1, n); L_1, L_2 \in \mathbb{N}^+ \quad (5.2)$$



**Figura 5.1** – Diseño en planta de una celda de aparcamiento

Tal y como se aprecia en la figura 5.1, se ha definido la longitud horizontal de la celda como el producto entre el número de vehículos por columna, y la anchura de una plaza de aparcamiento, que se ha tomado como valor estándar 2,5 metros. Asimismo, se ha definido la longitud vertical de una celda, como el producto entre el número de vehículos por fila y la longitud estándar de la plaza de aparcamiento, que se ha tomado de 4 metros.

Al haber escogido como válido el modelo de aparcamiento perpendicular al muelle que proponía Mattfeld (2006), las celdas de aparcamiento tienen la restricción de disponer mayor o igual número de vehículos por columna que de vehículos por fila ( $L_1 \geq L_2$ ). Este hecho contribuirá de manera decisiva en los tiempos de acceso a las distintas celdas de aparcamiento que conformen la campa de almacenaje, así como en otros parámetros que serán analizados más detalladamente en apartados siguientes.

Uno de los parámetros que será estudiado más adelante hace referencia a las recolocaciones a realizar para acceder a un vehículo determinado en el interior de la celda. Parece lógico pensar que cuanto mayor sea el valor de  $L_2$ , mayor número de vehículos se tendrán que mover para acceder a los del interior de la celda, con el consiguiente aumento de la carga de trabajo a la que los conductores estarán sometidos.

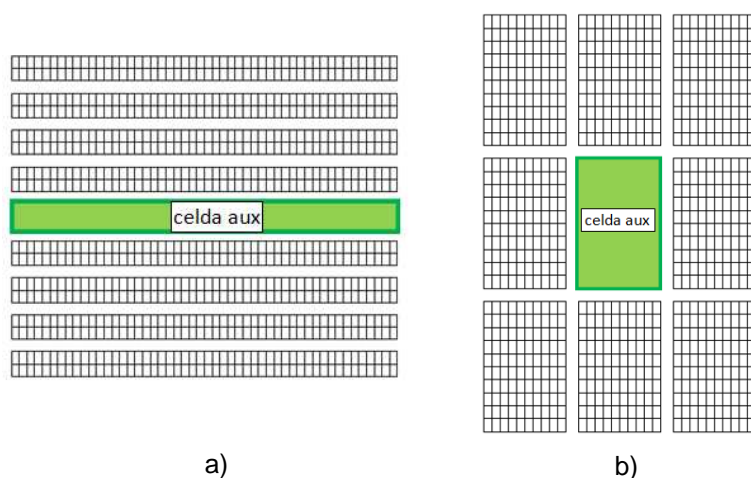


## 5.4 DISEÑO EN PLANTA DE LOS BLOQUES DE APARCAMIENTO

Una vez definido como será la configuración a nivel microscópico de los aparcamientos de los vehículos, que quedarán englobados en las celdas, es momento de configurar cómo estas celdas serán unidas en la campa de almacenaje. Se pretende englobar varias celdas en un conjunto superior llamado bloque para facilitar la movilidad de los vehículos en caso de tener que ser recolocados. El número de celdas que se coloquen por bloque variará en función de las necesidades del operador, siendo estos bloques rectangulares. Así, se utilizará un ángulo de bloque  $\alpha=90^\circ$  tal y como proponían Bingle, et al. (1987) en sus estudios. Esto también hará aumentar el ancho de carril a utilizar entre celda, siendo esta disposición la más adecuada para procesos de importación con tratamiento de vehículos por lotes.

Para cada tipo de celda existirá una distribución en planta óptima de bloque, dependiendo del número de celdas que se quiera utilizar, intentando siempre que se asegure el máximo aprovechamiento del espacio disponible para almacenaje. Cada bloque de almacenaje podrá estar formado por  $j$  celdas, donde una de estas celdas será la que se considerará como auxiliar, de tal forma que permita realizar las posibles recolocaciones de vehículos o movimientos internos de redistribución de espacio. La función de esta celda auxiliar será permitir reagrupar los vehículos que han quedado dispersos en las otras celdas del bloque, de manera que las nuevas incorporaciones de vehículos se puedan realizar de nuevo en estas celdas ya vacías.

Existen varias configuraciones de bloques, en función del número de celdas auxiliares que se habiliten y de la colocación de las mismas. En este estudio se ha pretendido colocar estas celdas auxiliares de manera que se minimice la distancia respecto a las demás celdas que conformen el bloque. Para acotar más el problema a estudiar, se han analizado únicamente bloques que estén conformados por nueve celdas ( $j=9$ ). Dependiendo del diseño de las celdas, que centrará buena parte de nuestro estudio, se diseñarán los bloques en planta, tal y como se muestra en la figura 5.2, que muestra varias posibilidades de bloques en planta.



**Figura 5.2** – Diseño en planta de los bloques de aparcamiento formados por 9 celdas, con la celda auxiliar en la parte central del bloque. (a) Parámetro de forma de la celda  $\beta=n/4$ .  
(b) Parámetro de forma de la celda  $\beta=1$ .



## 5.5 PARÁMETROS VALORADOS EN LA MODELIZACIÓN

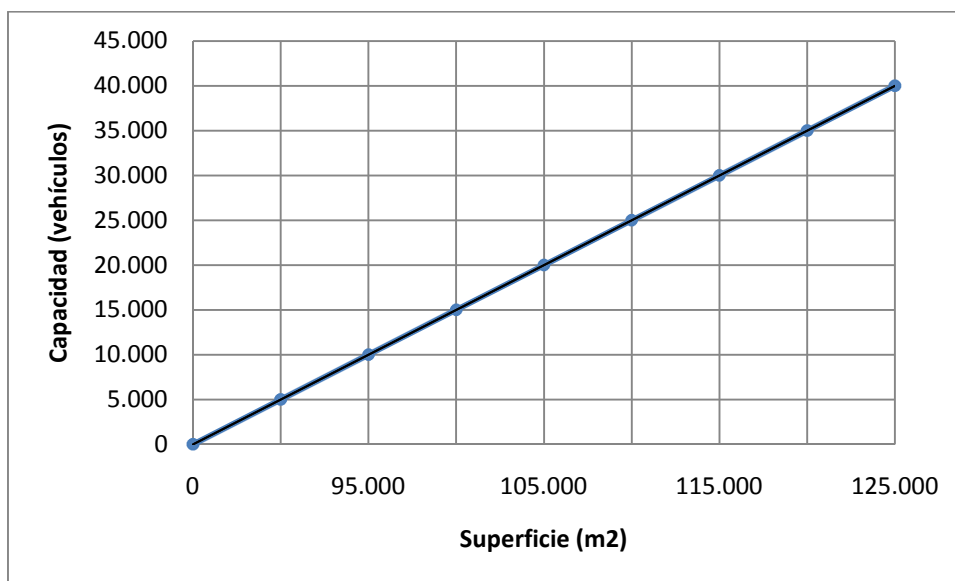
Para determinar qué configuración de bloques y celdas responde mejor a las necesidades del operador logístico, es necesario analizar una serie de parámetros que variarán en función de la configuración escogida. La viabilidad de cada diseño vendrá en parte determinada por el espacio disponible en el puerto donde se ubica la terminal de vehículos. Así, un diseño en concreto de bloques se verá repetido en menor o mayor número, dependiendo del espacio que se tenga en la terminal.

Los parámetros que se tendrán en consideración para el análisis del diseño en planta de las celdas de aparcamiento son los siguientes:

- Capacidad de la campa de almacenaje
- Tiempo de acceso al aparcamiento
- Productividad de la mano de obra
- Estudio de las remociones

### Capacidad de la campa de almacenaje

El primer parámetro estudiará la relación entre una configuración en concreto de celdas y bloques y la capacidad que se obtiene en la campa de almacenaje para tal estrategia de aparcamiento. De esta manera, se podrá determinar cuál es la configuración que con un área  $S$  determinada consigue una mayor capacidad. O por el contrario, al tener fijada una capacidad por parte del operador, utiliza menos espacio para aparcarse a todos los vehículos. Para cada configuración en concreto, los valores de capacidad y espacio variarán considerablemente, siendo la evolución esperada de las configuraciones en planta la que se muestra en la figura 5.3.



**Figura 5.3** – Gráfico de la relación esperada entre capacidad de la campa y superficie utilizada



### **Tiempo de acceso al aparcamiento**

El segundo parámetro se centrará en el estudio del tiempo de acceso a una celda dada la distribución en planta de la misma. Sabiendo el tiempo que se tarda en acceder a una celda en concreto, se podrá calcular luego el tiempo de acceso a un bloque de aparcamiento desde el punto de acceso de los vehículos a la campa de almacenaje. Este punto de acceso se tomará en el punto de conexión entre la campa de almacenaje (subsistema de almacenaje) y el buffer de descarga (subsistema de descarga). Será a partir de allí desde el que se calcularán las distancias medias de acceso a un bloque de aparcamiento y los tiempos, dadas unas velocidades de maniobra previamente estudiadas. De los resultados que se obtendrán, se espera que varíen considerablemente los tiempos de acceso dependiendo de cuál sea la configuración en planta escogida de celdas y bloques.

Para definir el tiempo total de acceso a un bloque  $i$  y una celda  $j$  ( $t_{Tij}$ ), se considerará el tiempo de acceso al aparcamiento ( $t_a$ ), que se tomará desde el centro de gravedad de cada celda de aparcamiento hasta el punto de introducción de los vehículos a la campa de almacenaje (punto origen), así como el tiempo de maniobra ( $t_m$ ) que los conductores tardan en acceder al vehículo que los traslada de nuevo al buffer de descarga para seguir con su tarea de aparcamiento de los  $n$  vehículos.

$$t_{Tij} = t_a + t_m \quad (5.3)$$

Dependiendo de la configuración de las celdas y el valor del parámetro de forma ( $\beta$ ), el tiempo de acceso aumentará en menor o mayor porcentaje respecto a las otras configuraciones.

### **Productividad de la mano de obra**

Para el estudio de la mano de obra necesaria para realizar una tarea de aparcamiento deben definirse cuáles son los valores de productividad del grupo de conductores. Este valor de productividad vendrá condicionado por el punto de destino, ya que a mayor distancia del buffer de descarga, menor productividad se tendrá.

Se define la función de productividad ( $\varphi_{ij}$ ) como el tiempo total de acceso a un bloque, tal y como se ha mostrado en la fórmula 5.3 anterior. Esta función de productividad depende directamente de la distancia de conducción entre el buffer de descarga (punto origen) y el punto de destino en el aparcamiento (bloque  $i$ , celda  $j$ ), de las maniobras de entrada y salida de los vehículos por parte de los conductores, y del tiempo entre el primer conductor del grupo y el último.

$$\varphi_{ij} = t_{Tij} \quad (5.4)$$

El tiempo entre el origen y destino de los vehículos ( $t_{Tij}$ ) viene definido por la distancia entre los dos puntos, dividido por la velocidad de circulación de los vehículos en el interior de la campa, que se ha calculado en aproximadamente 50 km/h.





$$t_{Tij} = \frac{2 \cdot D_{ij}}{v} \quad (5.5)$$

Donde:  $D_{ij}$ : distancia entre origen y destino

$v$ : velocidad de circulación por el interior de la campa ( $v \approx 50$  km/h)

Este valor de productividad nos da una aproximación del tiempo de un ciclo de aparcamiento en el que ha intervenido una única mano de obra. Conociendo el volumen de vehículos a aparcar y el número de manos de obra utilizadas, se podrá determinar el tiempo que se tardará en introducir todo el paquete de vehículos en la campa de almacenaje. De esta manera, se podrá obtener una tabla que nos indicará claramente qué puntos de la campa disponen de una mejor conexión con el buffer de descarga y, por lo tanto, en los que se consiguen unos tiempos de aparcamiento menores.

Así, el tiempo total de ejecución de la tarea de aparcamiento para el k-buque que llega al puerto ( $t_k$ ) vendrá dado por la expresión siguiente:

$$t_k = c_k \cdot \varphi_{ij} \quad (5.6)$$

$$c_k = \frac{L_k}{P_k} \quad (5.7)$$

Donde:  $c_k$ : Número de ciclos a realizar para la tarea k.  $c_k \in \mathbb{N}^+$

$L_k$ : Número de vehículos a introducir en la campa en la tarea k. ( $L_k=n$ )

$P_k$ : Número de conductores asignados a la tarea k. ( $P_k=6 \cdot g_k$ ) siendo  $g_k$  el número de manos de obra utilizadas.

A cada tarea de aparcamiento  $k = \{1, 2, \dots, m\}$  le corresponderá un bloque  $i$  y una celda  $j$  de ubicación dentro de la campa de almacenaje de vehículos. De esta manera, será más sencillo el análisis de la mano de obra requerida para cumplir con las especificaciones temporales de llegada de buques posteriores al muelle de descarga, definida a partir del intervalo  $\Delta t$  impuesto según el nivel operacional que se tenga en la terminal.

El estudio de la productividad de la mano de obra será un elemento complementario del análisis de los otros parámetros. Si bien es cierto que se utilizará intrínsecamente en el desarrollo de la comparación de los demás parámetros, la productividad de la mano de obra servirá como herramienta de cálculo para abordar las distintas problemáticas que los operadores de las terminales deben afrontar. A partir de diseños en planta realizados con AutoCad, se han podido determinar las distancias que cada configuración de celdas y bloques presenta. Estos datos han sido tratados con posterioridad para determinar la validez de los modelos más eficientes a nivel de cargas de trabajo y ratios de desperfectos.



## **Estudio de las remociones**

El último parámetro analizado es el que centrará la mayor parte del trabajo. Este hace referencia a los movimientos de vehículos que se producen en el interior de la campa de almacenaje por diversos motivos. Es sabido por parte de los operadores de las terminales, que el movimiento de los vehículos en el interior de la campa de almacenaje son tareas improductivas al no ser cobradas al cliente, yendo a cargo del propio operador logístico. Además de este coste añadido de operación, cabe aumentar el índice de siniestralidad en los vehículos, ya que al realizar mayor número de movimientos crece la probabilidad de tener desperfectos en los vehículos, que al final también supondrán un incremento en los costes de explotación de la terminal.

Dentro de la campa de almacenaje se producen dos tipos de movimientos de vehículos, llamados remociones, que serán estudiadas para determinar cuál de las configuraciones de celdas y bloques reduce estos movimientos. Una óptima estrategia de aparcamiento tendrá que tener en cuenta que el número de recolocaciones sea mínimo para garantizar la viabilidad económica de las operaciones. Los dos tipos de movimientos de vehículos son los siguientes:

- Remociones internas
- Remociones externas

### **Remociones internas**

Se conoce que una vez los vehículos son introducidos en la campa de almacenaje, estos sufren una retirada estocástica que sigue una distribución probabilística en concreto dependiendo de la frecuencia en que vengan los clientes. Escogida una configuración en planta del aparcamiento, se deberá esperar un mayor o menor número de remociones internas para conseguir retirar un determinado vehículo. Así, cuanto mayor sea el número de vehículos en fila, mayor se prevé que sea el número de movimientos improductivos de vehículos a realizar para conseguir un vehículo determinado a entregar. De esta manera, la productividad de retirada de los vehículos irá estrictamente ligada a la utilización del espacio en la campa de almacenaje, ya que a mayor utilización del espacio parece razonable pensar que mayor número de remociones internas se deberán realizar al tener los vehículos más compactados.

Para el estudio de las remociones internas se recorre a la teoría de probabilidad de los modelos de duración. La idea se basa en definir la probabilidad de que ocurra un suceso en un intervalo de tiempo  $(t, t+\Delta t]$ , con la condición de que no haya ocurrido anteriormente hasta el tiempo  $t$  actual. El suceso se entiende como la remoción de un vehículo a realizar en una celda según cuál sea el número de vehículos en fila. Si consideramos la distribución exponencial, distribución que suele utilizarse en este tipo de modelos de duración, la expresión de la probabilidad de ocurrencia vendrá dada por:



$$P(t < T < t + \Delta t | T > t) = \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{P(T > t)} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{1 - F(t)} \quad (5.8)$$

Usando la teoría de la distribución exponencial y su función de distribución ( $F(t)$ ), podemos definir que la probabilidad toma la expresión:

$$P(t < T \leq t + \Delta t | T > t) = 1 - e^{-\mu \Delta t} \quad (5.9)$$

siendo  $\mu$  el ritmo de retirada de los vehículos de la campa y  $\Delta t$  el intervalo de tiempo entre observaciones. Es importante observar que tal probabilidad es independiente del tiempo, hecho que en numerosas ocasiones no cobra sentido, como sucede en el caso del estudio actual. Por esta misma razón, se optará por asociar la distribución exponencial con una probabilidad dependiente del tiempo que vendrá dada por la definición de la función de Hazard (Kiefer, 1988):

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (5.10)$$

Esta función representa el índice de ocurrencia que tendrá el suceso en el instante de tiempo  $t$ , dado que no ha ocurrido hasta ese preciso instante de tiempo.

Habitualmente, en todos los modelos de ocurrencia en los que interviene el tiempo, se tiene en cuenta la probabilidad de que no haya sucedido el evento en el intervalo de tiempo considerado. En este sentido, se definirá la función de supervivencia ( $S(t)$ ) como:

$$S(t) = 1 - F(t) \quad (5.11)$$

que conlleva a una expresión de la función de Hazard más compacta:

$$h(t) = \frac{f(t)}{S(t)} \quad (5.12)$$

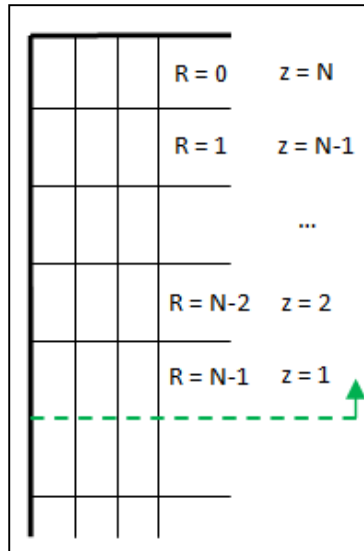
Partiendo de la hipótesis inicial del modelo, que definía que la retirada de los vehículos de la campa sigue una distribución exponencial, podemos definir la función de Hazard para el modelo estudiado como:

$$h(t) = \frac{\mu e^{-\mu t}}{1 - e^{-\mu t}} = \mu \quad (5.13)$$

Se puede observar que la función de Hazard para la distribución exponencial es constante, con valor  $\mu$  el ritmo de salida de los vehículos de la campa. Esto implica que el *hazard* de la distribución no tiene memoria, y que la probabilidad de ocurrencia en el siguiente intervalo no depende de cuánto se ha estado en el interior de la campa. Con toda la teoría de la función de Hazard presente, se puede determinar la probabilidad existente de remociones internas en una celda de aparcamiento.



Utilizando la formulación anterior, y definiendo como ocurrencia el hecho de retirar un vehículo situado en una posición concreta de una celda, se propone el esquema de la figura 5.4 que muestra el número de remociones internas esperadas ( $R$ ) según la posición de la plaza de aparcamiento en una celda en particular. Al poderse retirar los vehículos por los dos extremos de una celda, únicamente se consideran las plazas de aparcamiento que van desde el punto medio de la celda hasta un extremo, siendo  $z$  el número de la posición de la plaza de aparcamiento, que va directamente relacionado con el número de remociones a realizar.



**Figura 5.4** – Esquema en planta de una celda de aparcamiento partida, con los elementos ( $z$ ) de la mitad de las filas y las remociones ( $R$ ) a realizar según su posición

Por tanto, se entiende que un vehículo estacionado en la posición  $z=N$  tendrá cero remociones ( $R=0$ ), mientras que un vehículo que se encuentre ubicado en la posición  $z=1$ , necesitará de  $N-1$  remociones internas para ser retirado ( $R=N-1$ ), siendo  $N$  la mitad del número de vehículos de una hilera, ya que es posible retirar los vehículos por ambos extremos de la celda y existe una simetría horizontal en cada una de las celdas de aparcamiento:

$$N = \begin{cases} \frac{L_2}{2} & \text{si } L_2 \text{ es par} \\ \frac{L_2 + 1}{2} & \text{si } L_2 \text{ es impar} \end{cases} \quad (5.14)$$

En el supuesto caso que el número de vehículos por hilera sea impar, el vehículo central será atribuido a uno de los dos extremos, ya que el número de vehículos a retirar para acceder a éste es exactamente el mismo.

Como se ha comentado anteriormente, se utilizará la simetría horizontal de las celdas de aparcamiento para únicamente considerar las remociones que ocurren desde el centro de las mismas hasta sus extremos. Esta simplificación se puede realizar al saber que los vehículos pueden ser retirados solamente por los extremos inferior y superior, y que se optará por retirarlos por el extremo que precise de menor



distancia. Así, el número de remociones máximo a realizar en una columna vendrá determinado por el número de filas de media celda. En el caso genérico de tener  $N$  filas llenas de vehículos, el número máximo de remociones a realizar para el vehículo que se encuentra en la posición  $z=1$  será de  $N-1$  remociones.

Partiendo de este supuesto, se puede plantear la teoría para todos los elementos de la celda teniendo en cuenta la teoría de Hazard y la función exponencial, y sabiendo que se utilizará la función de supervivencia ( $S(t)$ ) para definir que un vehículo todavía se encuentra en la campa, la función de densidad ( $f(t)$ ) para el vehículo que debe ser retirado, y la función de distribución ( $F(t)$ ) para esos vehículos que ya no se encuentran en la campa y no suponen ningún impedimento para retirar el vehículo seleccionado.

En este sentido, se propone la formulación siguiente para determinar en cada instante de tiempo el número de remociones internas que se prevén. Así, a medida que aumenta el tiempo de permanencia de los vehículos en la campa de almacenaje y se van vaciando las celdas, se prevé que disminuya la probabilidad de tener que realizar un número elevado de remociones. Este valor también variará según la configuración de aparcamiento que se haya utilizado para ubicar a los vehículos dentro de la campa. Así, se prevé que a mayor número de filas, mayor probabilidad de realizar remociones para acceder al vehículo deseado.

$$P_{R=N-1}(t) = f(t) \prod_{z=1}^{N-1} S_z(t) = f(t)(1 - F_z)^{(N-1)} \quad (5.15)$$

$$P_{R=N-2}(t) = f(t) \prod_{z=1}^{N-1} S_z(t) + \binom{N}{1} f(t) F(t) \prod_{z=1}^{N-2} S_z(t) \quad (5.16)$$

⋮

$$P_{R=1}(t) = f(t) \prod_{z=1}^{N-1} S_z(t) + \binom{N}{1} f(t) F(t) \prod_{z=1}^{N-2} S_z(t) + \dots + \binom{N}{N-3} f(t) F^{(N-3)}(t) \prod_{z=1}^2 S_z(t) + \binom{N}{N-2} f(t) F^{(N-2)}(t) \prod_{z=1}^1 S_z(t) \quad (5.17)$$

Con esta teoría se calcula la probabilidad de tener un número determinado de remociones  $R \in [1, N-1]$  en una celda determinada. Para determinar la esperanza del número de remociones en un instante determinado de tiempo  $t$ , debe recurrirse a la definición de esperanza. Al tratarse el número de elementos de una variable aleatoria discreta  $\{1, 2, \dots, N-2, N-1\}$ , y sus probabilidades asociadas representadas por las funciones de probabilidad anteriores, la esperanza de remociones en una fila se calcula como:

$$E[R(t)] = \sum_{z=1}^{N-1} z \cdot P_{R=z}(t) \quad (5.18)$$



### Remociones externas

Tal y como se ha anunciado anteriormente, existe un segundo tipo de recolocaciones de vehículos dentro de la campa de almacenaje. Las llamadas remociones externas responden a la necesidad de reunificar los vehículos de las distintas celdas, que aún no han sido retirados, para crear espacios suficientes para el almacenamiento de un nuevo grupo de vehículos recién llegado al puerto.

Para el estudio de estas remociones, que reciben el nombre de externas al realizarse entre distintas celdas del mismo bloque, también se recurrirá a la teoría de los modelos de duración, especialmente a la que se refiere a la función de Hazard. Fijando la metodología que se ha utilizado para el cálculo de la probabilidad de tener remociones internas a lo largo del horizonte de planificación, se propondrá su adaptación al cálculo de la probabilidad de tener un cierto número de huecos en cada instante de tiempo. De esta forma, sabiendo el instante de tiempo de incorporación de los vehículos en la campa de almacenaje, se podrá determinar la esperanza de huecos en cada celda para cada instante de tiempo.

La adaptación de la formulación antes expuesta irá encaminada en utilizar las funciones de distribución y supervivencia, específicas para la distribución exponencial que nos determina la retirada de los vehículos de la campa de almacenaje para su entrega a los clientes. Así, la función de supervivencia ( $S(t)$ ) se corresponderá con el hecho de que el vehículo se encuentra todavía en la campa de almacenaje, hecho que nos refleja la no existencia de un hueco en esa posición de la celda. Por contrario, cada vez que aparezca un hueco se considerará que el suceso ya ha ocurrido, hecho que la teoría de la función de Hazard explicita con la función de distribución ( $F(t)$ ).

$$P_{H=n}(t) = \prod_{z=1}^n F_z(t) \quad (5.19)$$

$$P_{H=n-1}(t) = \binom{n}{1} S(t) \prod_{z=1}^{n-1} F_z(t) = \left(\frac{n!}{1!}\right) S(t) \prod_{z=1}^{n-1} F_z(t) \quad (5.20)$$

$$\vdots$$

$$P_{H=1}(t) = \binom{n}{n-1} F(t) \prod_{z=1}^{n-1} S_z(t) = \left(\frac{n!}{(n-1)!}\right) F(t) \prod_{z=1}^{n-1} (1 - F_z(t)) \quad (5.21)$$

$$P_{H=0}(t) = \prod_{z=1}^n S_z(t) = \prod_{z=1}^n (1 - F_z(t)) \quad (5.22)$$

Con esta teoría se calcula la probabilidad de tener un número determinado de huecos  $H \in [0, n]$  en una celda determinada. Para determinar la esperanza del número de vacíos en un instante determinado de tiempo  $t$ , debe recurrirse a la definición de esperanza. Al tratarse el número de elementos de una variable aleatoria discreta



$\{0,1,\dots,n-1,n\}$  y sus probabilidades asociadas representadas por las funciones de probabilidad anteriores, la esperanza de huecos en una celda se calcula como:

$$E[H(t)] = \sum_{z=0}^n z \cdot P_{H=z}(t) \quad (5.23)$$

Una vez se conozcan las esperanzas de huecos en las celdas que forman un bloque, se podrá definir la estrategia de reubicación de los vehículos entre las distintas celdas que reduzca al máximo las remociones a realizar, así como una óptima utilización de la mano de obra y del espacio de la campa de almacenaje.

También será de vital importancia determinar el tiempo de vaciado de una celda en concreto, que vendrá dado según cuales sean los niveles operacionales de la terminal. Se prevé que con un menor tiempo de vaciado, menor sea el número de remociones externas que se deban realizar.

## **CAPÍTULO 6**

---

### **METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE LA MODELIZACIÓN**





## 6.1 INTRODUCCIÓN

Una vez presentada la modelización que se realizará de la localización de los vehículos en la campa de almacenaje, es el momento de presentar las distintas configuraciones en planta escogidas para una terminal de vehículos y realizar su evaluación atendiendo a los parámetros presentados en el capítulo anterior. Para realizar esta evaluación se han propuesto distintos niveles operacionales, con varios ritmos de llegadas y salidas de vehículos de la terminal, para analizar también cuál de las estrategias de aparcamiento responde mejor a unas características operativas en concreto.

Para seguir correctamente los pasos seguidos en la evaluación de los casos numéricos propuestos, primeramente se presentarán las distintas particularidades de la evaluación. Estas particularidades harán referencia, primeramente, a las configuraciones de celdas y bloques escogidas para ser evaluadas, seguidas de los distintos niveles operacionales que se han evaluado para una terminal estándar de vehículos. Seguidamente, se presentarán los resultados más significativos para cada uno de los parámetros evaluados, así como la comparación entre las distintas configuraciones y estrategias de aparcamiento para determinar la viabilidad de ellas en las terminales de los puertos actuales.

## 6.2 PARTICULARIDADES DE LA EVALUACIÓN

La evaluación de las operaciones de aparcamiento en una campa de almacenaje se definirá a partir de la definición de dos elementos clave. Inicialmente se deberá definir qué estrategia de aparcamiento se decide utilizar, definiendo la celda auxiliar de aparcamiento, y la configuración en planta de celdas y bloques. Seguidamente, será importante definir los distintos ritmos de operaciones que se dan en la campa de almacenaje. Solamente de esta manera se podrán determinar las cargas de trabajo y la necesidad de mano de obra.

### Diseño de las configuraciones de localización

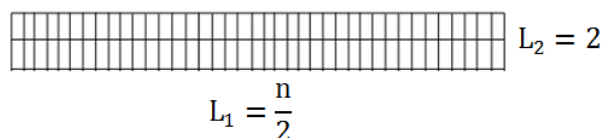
Se han diseñado tres configuraciones distintas de aparcamiento que a continuación serán analizadas con detalle. A partir del diseño de celda, se propondrá un único diseño en planta de bloque. Este diseño de bloque será el que menor espacio utilice y el que menor distancia media presente hasta la celda auxiliar.

Las tres configuraciones de celda escogidas han sido seleccionadas según varios criterios de diseño. Conocida la restricción técnica impuesta en la modelización anterior, en el que el número de vehículos por columna no podía ser inferior al número de vehículos por fila ( $L_1 \geq L_2$ ), se le añade el hecho de evaluar únicamente celdas con un número de vehículos por fila que sea par ( $L_2$  par, luego  $z = L_2 / 2$ ). Con estas hipótesis de partida, se diseñan las siguientes configuraciones de celda.



### Configuración 1: Aparcamiento en fila doble

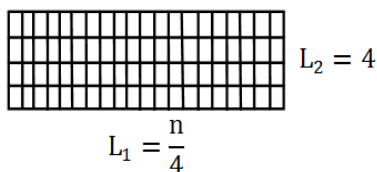
El diseño en planta de la celda se define por tener el grupo de  $n$  vehículos ubicado de tal manera que las recolocaciones para la retirada de los vehículos sean inexistentes. Este caso extremo obliga a tener únicamente dos filas de vehículos y  $n/2$  columnas, con lo que el parámetro de forma será  $\beta = n/4$ .



**Figura 6.1** – Diseño en planta de celda con  $\beta = n/4$

### Configuración 2: Aparcamiento en cuatro filas

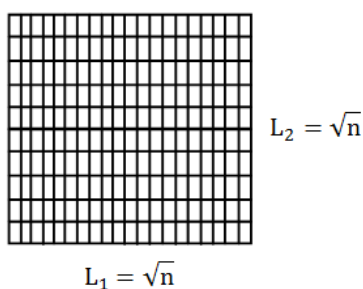
La segunda configuración de celda alberga a los vehículos llegados a la terminal en grupos de  $n$  vehículos en 4 filas y  $n/4$  columnas, con lo que es probable que para la retirada de los vehículos de las filas intermedias se deba realizar algún tipo de movimiento de los vehículos situados en las filas extremo. Con esta configuración el parámetro de forma adquiere el valor de  $\beta = n/16$ .



**Figura 6.2** – Diseño en planta de celda con  $\beta = n/16$

### Configuración 3: Aparcamiento en celda cuadrada

El tercer diseño de celda plantea la ubicación de los vehículos en una celda que disponga del mismo número de vehículos por fila que por columna ( $L_1 = L_2$ ). Esta configuración supone la maximización del número de recolocaciones a realizar cuando se requiere la retirada de un vehículo ubicado en la fila central. En este sentido, el parámetro de forma toma el valor de  $\beta = 1$ .



**Figura 6.3** – Diseño en planta de celda con  $\beta = n/16$



Para estudiar el impacto sobre la campa de almacenaje de las configuraciones de las distintas celdas de aparcamiento, es necesario disponer de varias estrategias de aparcamiento para comparar los resultados obtenidos. Cada una de las tres estrategias de aparcamiento que se expondrán a continuación utiliza una configuración distinta de celda a cada grupo de vehículos que tenga que ser servido desde el buffer de descarga.

Para el análisis de las distintas estrategias de aparcamiento que se propondrán a continuación es necesario definir previamente el número de vehículos que desearemos albergar en la campa de almacenaje, definiendo de esta una misma capacidad para todas las estrategias. A partir de este valor se podrán definir las necesidades de espacio en la terminal portuaria, así como un análisis en profundidad de la productividad de los conductores y de las remociones que se realizará más adelante en la evaluación de las estrategias. Es por esto que se han hecho las consideraciones previas siguientes:

- Cada celda de aparcamiento dispone del mismo número de plazas de aparcamiento que vehículos descargados por cada buque en el puerto ( $n$ ). En este sentido, cada celda dispondrá de  $n=100$  plazas de aparcamiento.
- Se albergará a los vehículos en bloques formados por 9 celdas cada uno de ellos, siendo utilizados  $i=6$  bloques de aparcamiento. De esta forma, se dispondrá de 54 celdas de aparcamiento distribuidas en los 6 bloques, que darán una capacidad total de 5.400 plazas de aparcamiento a la campa de almacenaje objeto del estudio.
- Cada bloque estará formado por 9 celdas de aparcamiento, formando una unidad superior de 900 plazas de aparcamiento. El bloque se definirá en planta con las 9 celdas colocadas de tal forma que se minimice la distancia total a la celda auxiliar que se situará en el centro de gravedad del bloque, siempre que esta distribución sea la que menos espacio utilice para el almacenamiento de los vehículos. Esta distribución facilitará las posibles recolocaciones que se deban realizar para vaciar ciertas celdas de aparcamiento.

Para poder comparar las distintas estrategias de aparcamiento que se propondrán, es necesario disponer de los parámetros de diseño adecuados para hacer esta comparación. Después de observar las operaciones en distintas terminales de vehículos, se ha llegado a la conclusión que las tres configuraciones en planta que se han propuesto para las celdas, son las que mayormente se utilizan. Así, las estrategias de aparcamiento irán encaminadas en adaptar las configuraciones anteriores a las campas de almacenaje.



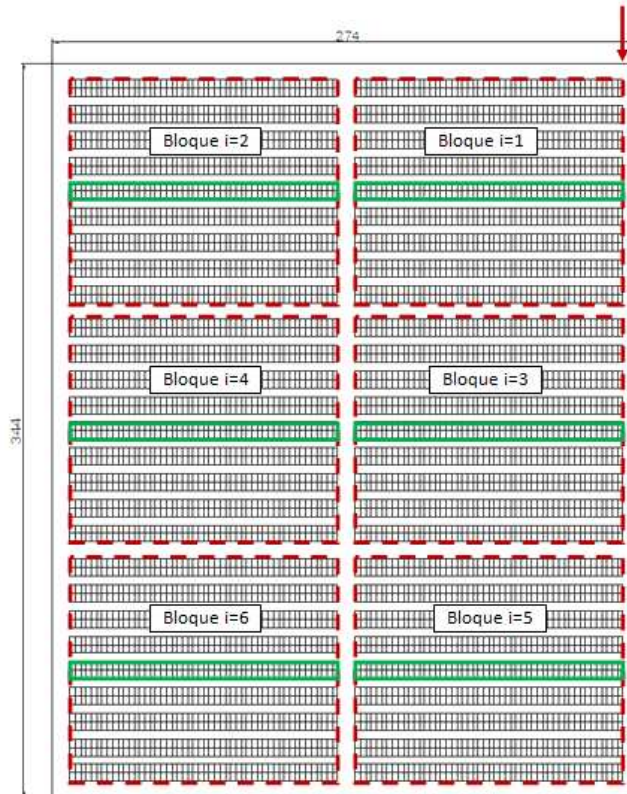
### Estrategia 1: Aparcamiento en fila doble

La primera estrategia de aparcamiento considerada tendrá como principal objetivo la eliminación de cualquier tipo de remoción interna por retirada estocástica de los vehículos de la campa. Esto se conseguirá utilizando la configuración 1 de celda. Al disponer esta configuración de 2 vehículos por fila ( $L_2=2$ ), y al albergar un grupo de 100 vehículos, la celda tendrá hasta 50 vehículos por columna ( $L_1=50$ ). En este sentido, el parámetro de forma de las celdas será:

$$\beta = \frac{L_1}{L_2} = \frac{n}{L_2^2} = \frac{100}{2^2} = 25, \quad \beta \in (1, n); L_1, L_2 \in \mathbb{N}^+ \quad (6.1)$$

Consecuentemente, el espacio ocupado por los vehículos será elevado al tener un mayor número de longitud de carriles de acceso en una campa de almacenaje estándar. Por el contrario, esta estrategia reducirá considerablemente la utilización de mano de obra destinada a la entrega de los vehículos al no tener que realizar ningún tipo de remoción interna para la retirada de los mismos.

Como se apuntaba en las consideraciones previas del modelo, la campa de almacenaje para todas las estrategias deberá tener la misma capacidad, definida en 54 celdas de 100 vehículos cada uno, con lo que se conseguirá una capacidad de 5.400 plazas para la campa de almacenaje, teniendo que utilizar una superficie de 94.256 m<sup>2</sup> (274m x 344m) en el caso de esta primera estrategia de aparcamiento en fila doble. Con esta consideración previa del modelo, se intentará optimizar la distribución de los bloques para la estrategia de aparcamiento en cuestión.



**Figura 6.4** – Esquema en planta de la estrategia de aparcamiento en doble fila para la campa de almacenaje estandarizada



La distribución en planta de la estrategia de aparcamiento que se propone en la figura 6.4 consistirá en llenar los bloques en el orden ascendente ( $i=1, \dots, 6$ ). A medida que los buques vayan descargando los grupos de vehículos en el buffer de descarga de la terminal, estos serán introducidos en la campa de almacenaje con un intervalo de tiempo  $\Delta t$  fijo entre ellos. De esta manera, se puede asegurar el almacenaje de 54 grupos de vehículos en la campa de almacenaje sin necesidad de realizar ningún tipo de recolocación de vehículos. Siguiendo la estrategia propuesta, se llenará primeramente los bloques más cercanos al muelle ( $i=1, 2$ ) y a medida que se acumulen las llegadas de buques con el tiempo se procederá a llenar la resta de bloques, tal y como queda reflejado en la figura adjuntada.

La estrategia de aparcamiento prevé incorporar el primer grupo de vehículos de un bloque en la celda central del conjunto de nueve celdas que lo forman. Posteriormente, se procederá al llenado de las 8 celdas restantes ( $j=2, \dots, 9$ ). A medida que las celdas de vehículos que forman el bloque se vaya vaciando, que como se apuntaba en las consideraciones previas del modelo tendrán una retirada de vehículos siguiendo una distribución exponencial, se podrán recolocar los vehículos en la celda central. Esta remoción externa de vehículos se podrá realizar cuando los espacios vacíos existentes en la primera celda ( $j=1$ ) sean igual al número de vehículos restantes en las 8 celdas que completan el bloque. Esta remoción de vehículos se realizará para dotar de suficiente espacio libre a la campa de almacenaje para que las operaciones de incorporación de nuevos grupos de vehículos en la campa de almacenaje se realicen con las máximas garantías de productividad.

Con esta estrategia en fila doble se asegura la ausencia de remociones internas, al disponer de celdas con únicamente dos filas, y se minimizan las remociones externas, aunque éstas sean necesarias para garantizar el óptimo funcionamiento de la terminal.



**Figura 6.5** – Estrategia de llenado de un bloque de aparcamiento en doble fila. La celda central será la primera a ser llenada y posteriormente se procederá al llenado del resto

Para poder adaptar la metodología del modelo a la estrategia en cuestión, es necesario recordar que para encontrar la igualdad entre el número de vacíos que tiene la celda central y el número de vehículos restantes en las otras ocho celdas, se debe recurrir a la definición de esperanza aportada en el capítulo anterior. En este sentido,





el número esperado de vacíos en la celda central ( $j=1$ ), será igual al sumatorio del número esperado de vehículos en las celdas restantes.

$$E[H_{i1}(t)] = 800 - \sum_{j=2}^9 E[H_{ij}(t)], \quad \forall i \in (1,6) \quad (6.2)$$

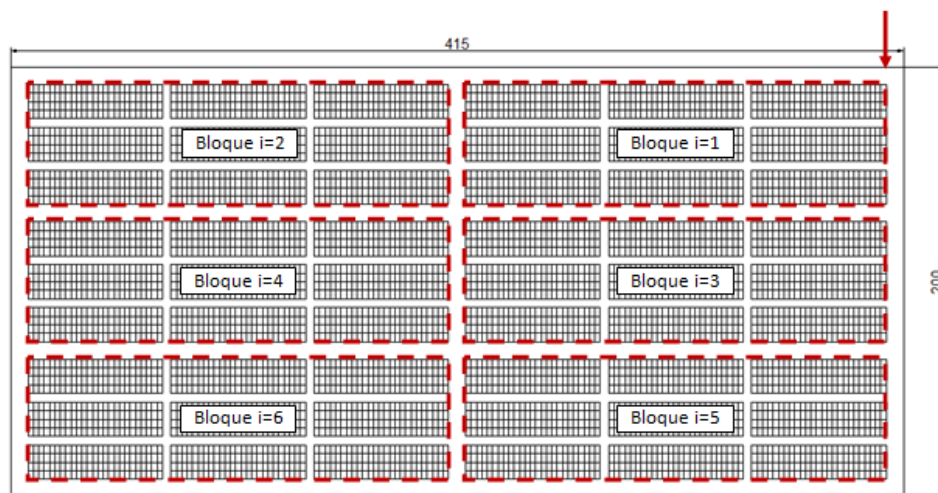
En la evaluación temporal que se realizará posteriormente se podrá observar si esta estrategia, que en principio parece conservadora y lejos del óptimo operativo para la terminal de vehículos, puede ser utilizada para el operador logístico en alguna situación.

### Estrategia 2: Aparcamiento en cuatro filas

La propuesta para mejorar la estrategia de aparcamiento en fila doble consiste en crear celdas de aparcamiento que doblen el número de filas y, de esta manera, pasen a albergar cuatro vehículos en una misma columna (siguiendo la configuración 2 de celdas). De esta manera, si bien es cierto que se reducirá considerablemente el espacio necesario para albergar las 54 celdas de que deberá disponer la campa de almacenaje, también lo es que se aumentan las probabilidades de remoción interna. En este caso, el valor del parámetro de forma ( $\beta$ ) se verá reducido respecto a la configuración 1 anterior, al tener mayor número de vehículos por fila.

$$\beta = \frac{L_1}{L_2} = \frac{n}{L_2^2} = \frac{100}{4^2} = 6,25, \quad \beta \in (1, n); L_1, L_2 \in \mathbb{N}^+ \quad (6.3)$$

Para esta segunda estrategia de aparcamiento se ha requerido de una superficie de 83.000 m<sup>2</sup> (415m x 200m) para albergar las 5.400 plazas necesarias, lo que supone una reducción de aproximadamente el 14% de espacio respecto a la primera estrategia. Para analizar las probabilidades de remociones internas debido a la retirada de los vehículos de manera aleatoria, se deberá recurrir a la teoría de probabilidad de modelos de duración propuesta en el capítulo anterior.

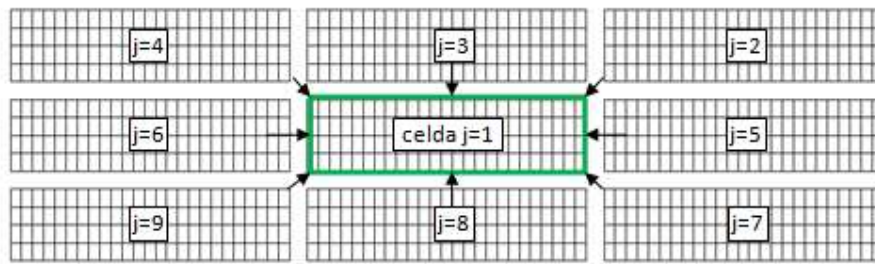


**Figura 6.6** - Esquema en planta de la distribución de bloques para la estrategia de aparcamiento en cuatro filas en la campa de almacenaje capaz de albergar a 5.400 vehículos



En la figura 6.6 se observa la distribución de las celdas para la estrategia de aparcamiento en cuatro filas. Tal y como se ha realizado en la primera estrategia propuesta, se prioriza el llenado de los dos bloques más cercanos al muelle ( $i=1,2$ ) y posteriormente se procede al llenado de los demás bloques restantes en el orden ascendente impuesto por la numeración de los bloques.

Tal y como se exponía también en la primera estrategia, se ha pensado en un sistema para recolocar los vehículos restantes en las distintas celdas mediante las llamadas remociones externas. Estas remociones, en esta segunda estrategia, consistirán en recolocar todos los vehículos restantes de un bloque en la celda central del mismo, cuando haya transcurrido el tiempo suficiente para que en esta celda central se haya producido el número de vacíos que lo permita.



**Figura 6.7**– Estrategia de remociones externas propuesta para la estrategia de aparcamiento en cuatro filas, con la reconsolidación de los vehículos en la celda auxiliar central  $j=1$

Para determinar la probabilidad de tener remociones internas con la estrategia de aparcamiento en cuatro filas se propone la siguiente formulación basada en la función de Hazard.

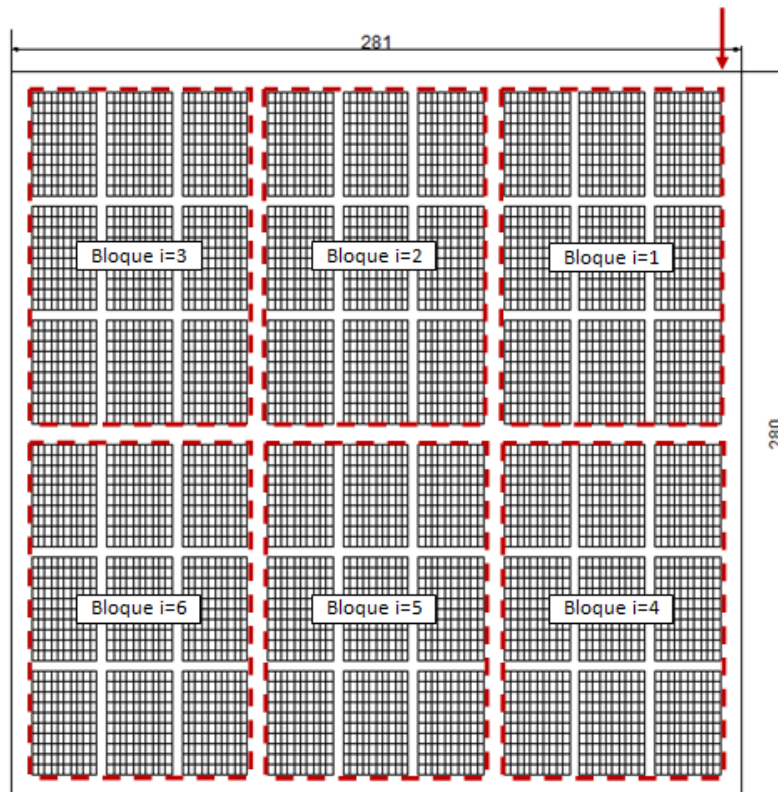
$$P_{R=1}(t) = f(t) \cdot S(t) \quad (6.4)$$

$$E[R(t)] = \sum_{z=1}^{N-1} z \cdot P_{R=z} = 1 \cdot P_{R=1}(t) \quad (6.5)$$

Al aplicar la simetría central en el eje horizontal de la celda para el análisis de las remociones, únicamente es necesario calcular la probabilidad de tener una remoción para la retirada de los vehículos. Este caso se producirá cuando el vehículo a retirar (representado por la función de densidad  $f(t)$ ) esté situado en alguna de las dos filas interiores de la celda, combinado con que el vehículo situado en las filas extremo de la celda todavía permanezca en la cama (representado por la función de supervivencia  $S(t)$ ).

### Estrategia 3: Aparcamiento en celda cuadrada

Como tercera y última estrategia de aparcamiento se propone aparcarse los vehículos en la campa de almacenaje en celdas cuadradas, tal y como proponía la configuración 3 de celdas. El diseño de la campa de almacenaje, al poder comprimir tanto las celdas de vehículos, únicamente necesitará de una superficie cuadrada (281m x 280m) de 78.680 m<sup>2</sup> para albergar a los 5.400 vehículos, lo que supone una reducción del 20% de espacio en comparación con la estrategia 1 propuesta de aparcamiento en fila doble. Por el contrario, las remociones internas esperadas con esta estrategia aumentarán considerablemente al tener diez vehículos en fila con dos únicas salidas posibles por cada uno de los extremos de la celda.



**Figura 6.8** - Esquema en planta de la distribución de bloques y estrategia de aparcamiento en celda cuadrada para la campa de almacenaje

En este caso, tal y como se puede intuir en la figura 6.8 donde se observa que existe el mismo número de vehículos por fila y por columna en las celdas, el parámetro de forma de una celda será el siguiente:

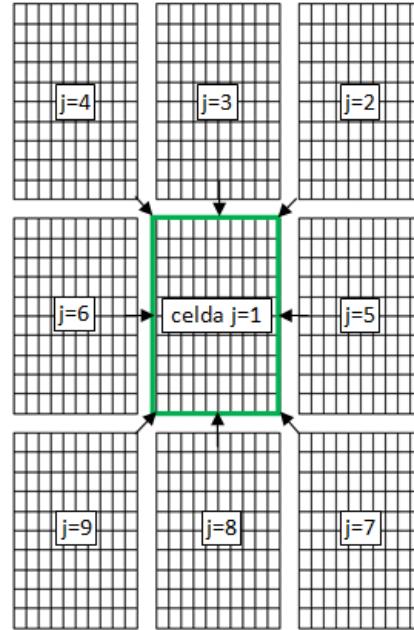
$$\beta = \frac{L_1}{L_2} = \frac{n}{L_2^2} = \frac{100}{10^2} = 1, \quad \beta \in (1, n); L_1, L_2 \in \mathbb{N}^+ \quad (6.6)$$

La distribución en planta de las celdas seguirá un esquema parecido al implementado en la segunda estrategia de aparcamiento. Tal y como se ha comentado anteriormente, se irán llenando los bloques más cercanos al muelles y a la flecha de entrada de los vehículos a la campa de almacenaje, tal y como queda ejemplificado en la figura 6.8.





En esta tercera estrategia de aparcamiento se puede observar como la compactación de las celdas de aparcamiento permite disponer de bloques de aparcamiento con distancias menores entre ellos. Esta característica beneficiará no solo a la reducción del espacio utilizado, sino también a la reducción del tiempo de incorporación de los nuevos grupos de vehículos en la campa de almacenaje, y de las distancias de reconsolidación de los vehículos en la celda central de cada bloque, tal y como se observa en la figura 6.9.



**Figura 6.9** – Estrategia de remociones externas propuesta para la estrategia de aparcamiento en celda cuadrada, con la reconsolidación de los vehículos en la celda central (j=1)

En la figura 6.9 se puede observar que el número de la celda especifica el orden de aparcamiento de los grupos de vehículos en el bloque. De esta manera, el primer grupo de vehículos en llegar al bloque se colocará en la celda central. Progresivamente se irán llenando las celdas restantes en orden ascendente a medida que se produzcan las llegadas de los grupos de vehículos a la campa de almacenaje (llegadas que se distribuyen mediante un incremento de tiempo  $\Delta t$  fijo entre ellas). Para aplicar la teoría propuesta en el capítulo anterior, deberemos determinar el tiempo en que se produce la igualdad entre el número de huecos en la celda 1, y los vehículos restantes en las celdas de la 2 a la 9. De esta forma se podrá determinar mediante la evaluación temporal posterior, en que instante de tiempo del horizonte de planificación se podrá realizar la recolocación de estos vehículos tal y como propone la igualdad 6.7

$$E[H_{i1}(t)] = 800 - \sum_{j=2}^9 E[H_{ij}(t)], \quad \forall i \in (1,6) \quad (6.7)$$

Por lo que respecta al número de remociones internas esperado en cada una de las celdas, deberá calcularse de manera individual. Así, existirá la posibilidad de



tener desde una hasta cuatro remociones, dependiendo del instante de tiempo y de los ritmos de llegada y salida de los vehículos de la campa. Aplicando la formulación de la función de Hazard, las probabilidades de remoción internas con el tiempo serán las que se especifican a continuación.

$$P_{R=1}(t) = f(t)S(t)^4 + \binom{5}{1}F(t)f(t)S(t)^3 + \binom{5}{2}F(t)^2f(t)S(t)^2 + \binom{5}{3}F(t)^3f(t)S(t) \quad (6.4)$$

$$P_{R=2}(t) = f(t)S(t)^4 + \binom{5}{1}F(t)f(t)S(t)^3 + \binom{5}{2}F(t)^2f(t)S(t)^2 \quad (6.5)$$

$$P_{R=3}(t) = f(t)S(t)^4 + \binom{5}{1}F(t)f(t)S(t)^3 \quad (6.6)$$

$$P_{R=4}(t) = f(t) \cdot S(t)^4 \quad (6.7)$$

Como ya se ha apuntado anteriormente, la función de densidad ( $f(t)$ ) especifica el elemento que quiere ser retirado de una columna en concreto, la función de distribución ( $F(t)$ ) nos muestra el número de vehículos que ya no están presentes en la columna, y la función de supervivencia nos determina el número de vehículos que todavía están presentes en una columna y que impiden la salida del vehículo en cuestión, por lo que deberán ser recolocados.

Con lo que la esperanza de remoción interna en una columna para cualquier instante de tiempo vendrá determinada por el sumatorio

$$E[R(t)] = \sum_{z=1}^{N-1} z \cdot P_{R=z} = 4 \cdot P_{R=4}(t) + 3 \cdot P_{R=3}(t) + 2 \cdot P_{R=2}(t) + 1 \cdot P_{R=1}(t) \quad (6.8)$$

Esta esperanza de remociones, al disponer de 10 vehículos en una misma columna, será mucho superior a la que se obtiene para la segunda estrategia, donde solamente se aparcaban 4 vehículos por columna. Parece evidente pensar que la utilización de mano de obra para la retirada de los vehículos será mucho superior con esta estrategia.

En la posterior evaluación temporal se podrá comprobar si estos supuestos de funcionamiento de la terminal usando esta estrategia se cumplen según lo previsto. Las particularidades de esta estrategia podrá hacerla preferente según cuál sea el nivel operacional de la terminal portuaria de vehículos en un momento determinado. Serán estos resultados los que darán una idea de la utilización de capacidad en la campa de almacenaje, la necesidad de mano de obra para cumplir con los intervalos de tiempos de incorporación de los vehículos en la campa, y las remociones esperadas. A partir de estos resultados, se podrá determinar la estrategia óptima de aparcamiento de los vehículos en la campa de almacenaje considerada en este estudio.



## **Diseño de los ritmos operacionales**

La evaluación de las estrategias de localización de vehículos (MLV) se ha realizado mediante el programa Microsoft Excel 2007, que ha permitido introducir toda la formulación estadística, específica del modelo, expuesta en el capítulo anterior, juntamente con las consideraciones de los ritmos operativos del puerto que a continuación se introducirán.

En las consideraciones previas a la realización de la simulación han intervenido factores previamente estudiados. Estos hacen referencia al conocimiento de los ritmos de llegada de los buques al puerto y de los ritmos de salida de vehículos de importación de la campa por vía terrestre. De esta manera, se han podido diseñar distintos escenarios con un horizonte temporal constante de 90 días para todas ellas ( $t=90$  días).

Las evaluaciones han considerado tres ritmos de llegada de buques distintos según se tuviese un nivel operacional bajo, medio o alto en la terminal portuaria. Estos ritmos de llegada ( $\lambda$ ) han definido, a su vez, un intervalo de tiempo ( $\Delta t$ ) constante de introducción de los grupos de vehículos en la campa de almacenaje, que se ha hecho coincidir con el ritmo de llegadas de los buques al puerto. Aunque esta aproximación no sea siempre del todo cierta, debido al estacionamiento previo de los vehículos en el buffer de descarga, se ha considerado oportuno simplificar la interconexión entre estos dos subsistemas de la terminal para facilitar el análisis que ocupa este estudio. La tabla 6.1 muestra los tres niveles operacionales considerados para la simulación del ritmo de llegadas.

Nivel operacional	Ritmo de llegadas ( $\lambda$ )	Intervalo de tiempo entre llegadas ( $\Delta t$ )
Bajo	0,5 buques/día	2 días
Medio	1 buque/día	1 día
Alto	1,67 buques/día	0,6 días

**Tabla 6.1** – Valores de los tres ritmos de llegada de vehículos a la campa utilizados en la simulación

A su vez, también se han definido tres ritmos de salida de los vehículos de la campa. Estas salidas se producen a petición de los clientes de los vehículos que, como se pudo comprobar en los capítulos previos al modelo, varían considerablemente en según qué época del año nos encontremos. Estos tres ritmos de salida ( $\mu$ ) también se han clasificado como bajo, medio y elevado, según los valores que se muestran en la tabla 6.2. Para poder obtener unos valores de retirada de vehículos coherentes, se ha decidido por encontrar tres valores de  $\mu$  que se ajustaran al tiempo necesario para liberar el 90% del espacio de la celda. Estos valores se han obtenido de la aplicación de la formulación de la función de Hazard, en este caso de la función de distribución  $F(t)$ . De esta manera, es lógico considerar que a menor tiempo de vaciado de las celdas, mayor será el ritmo de salidas de vehículos de la campa.



Nivel operacional	Ritmo de salidas ( $\mu$ )	F(t)=0,90
Bajo	2 vehículos/día·celda	t = 45 días
Medio	3 vehículos/día·celda	t = 30 días
Alto	6 vehículos/día·celda	t = 15 días

**Tabla 6.2** – Valores de los tres ritmos de salida de vehículos de la campa utilizados en la simulación

De la combinación de estos tres ritmos de llegada de vehículos a la campa y de salida de los mismos de ella, se ha realizado un análisis de sensibilidad de las estrategias de aparcamiento anteriormente definidas. Así, tal y como se refleja en la tabla 6.3, se puede ver la nomenclatura utilizada para identificar cada una de las simulaciones realizadas.

Ritmo de llegadas Ritmo de salidas	Nivel operacional medio $\lambda = 1$ buque/día	Nivel operacional alto $\lambda = 1,67$ buques/día	Nivel operacional bajo $\lambda = 0,5$ buques/día
Nivel operacional medio $\mu = 3$ veh/día·celda	Simulación 1	Simulación 4	Simulación 7
Nivel operacional alto $\mu = 6$ veh/día·celda	Simulación 2	Simulación 5	Simulación 8
Nivel operacional bajo $\mu = 2$ veh/día·celda	Simulación 3	Simulación 6	Simulación 9

**Tabla 6.3** – Ritmos de llegadas y salidas de la campa utilizadas en el estudio de sensibilidad de las estrategias de aparcamiento propuestas

## **CAPÍTULO 7**

---

### **EVALUACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE LOCALIZACIÓN**



## 7.1 INTRODUCCIÓN

Los parámetros que se evaluarán a continuación coinciden con los que se han propuesto en la modelización del capítulo anterior, y que permitirán abordar con mayor precisión cuales son las características de diseño u operatividad que restringen en mayor grado las operaciones de una campa de vehículos.

Tal y como se ha anunciado a lo largo de este estudio, los parámetros que se valorarán a continuación, una vez realizada la simulación temporal de las estrategias de aparcamiento propuestas, son los siguientes:

- Capacidad de la campa de almacenaje
- Tiempo de acceso al aparcamiento
- Productividad de la mano de obra
- Estudio de las remociones

## 7.2 CAPACIDAD DE LA CAMPA DE ALMACENAJE

Para el diseño en planta de los tres aparcamientos que se han analizado, se han colocado los bloques y las celdas de aparcamiento de tal manera que se cumpla el número de filas según cada estrategia, pero a su vez reduciendo al máximo el espacio utilizado en la campa para disponer de las 5.400 plazas de diseño.

Tal y como se ha expuesto en el apartado anterior, el espacio necesario en la estrategia 1 (aparcamiento en doble fila), que presenta un parámetro de forma igual  $\beta=25$ , ha sido de 94.256 m<sup>2</sup>. La estrategia 2 de aparcamiento en cuatro filas y con parámetro de forma  $\beta=6,25$ , se ha necesitado de una ocupación de 83.000 m<sup>2</sup>. Finalmente, para la estrategia 3 de aparcamiento en celda cuadrada, que tiene un parámetro de forma  $\beta=1$ , ha sido de 78.680 m<sup>2</sup>. Estos resultados nos indican que a menor parámetro de forma, menor necesidad de espacio en la campa de almacenaje para albergar el mismo número de vehículos. Esta conclusión ya se había apuntado en los análisis previos en la modelización de localización de vehículos.

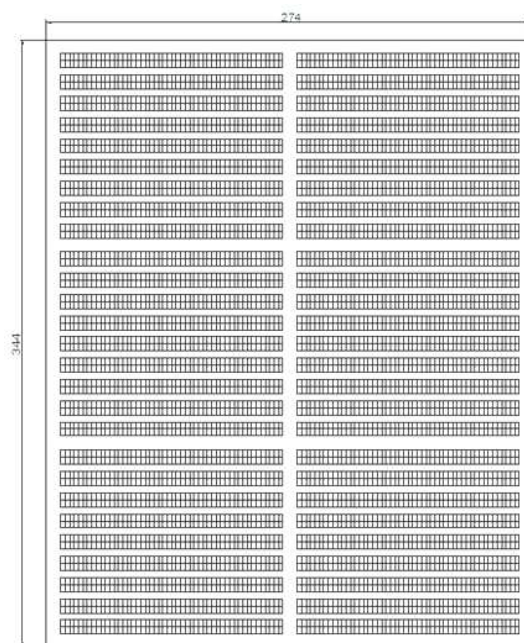
Con estos valores, que quedan representados por las configuraciones de la figura 7.1, se puede concluir que la reducción de espacio de la estrategia 2 (aparcamiento en cuatro filas) respecto la primera (aparcamiento en doble fila) es del 13,6%. Por su parte, la reducción de espacio que presenta la tercera de las estrategias (aparcamiento en celda cuadrada) debido a la compactación de las celdas de aparcamiento, supone una reducción de espacio del 19,8% respecto la primera estrategia. Comparando la estrategia 3 y la estrategia 2 de aparcamiento, la tercera supone una reducción del 5,5% de espacio respecto la segunda.

**Estrategia 1****Aparcamiento en fila doble**

Parámetro de forma:  $\beta=25$

Capacidad: 5.400 plazas

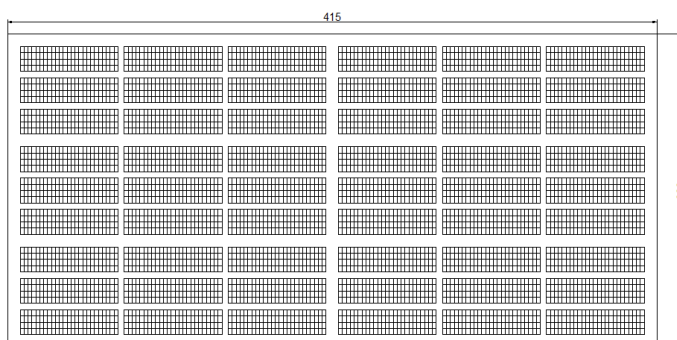
Superficie aparcamiento: 94.256 m<sup>2</sup>

**Estrategia 2****Aparcamiento en cuatro filas**

Parámetro de forma:  $\beta=6,25$

Capacidad: 5.400 plazas

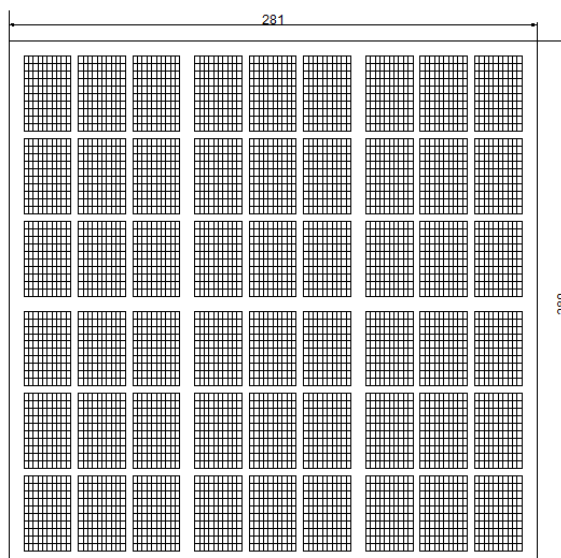
Superficie aparcamiento: 83.000 m<sup>2</sup>

**Estrategia 3****Aparcamiento en celda cuadrada**

Parámetro de forma:  $\beta=1$

Capacidad: 5.400 plazas

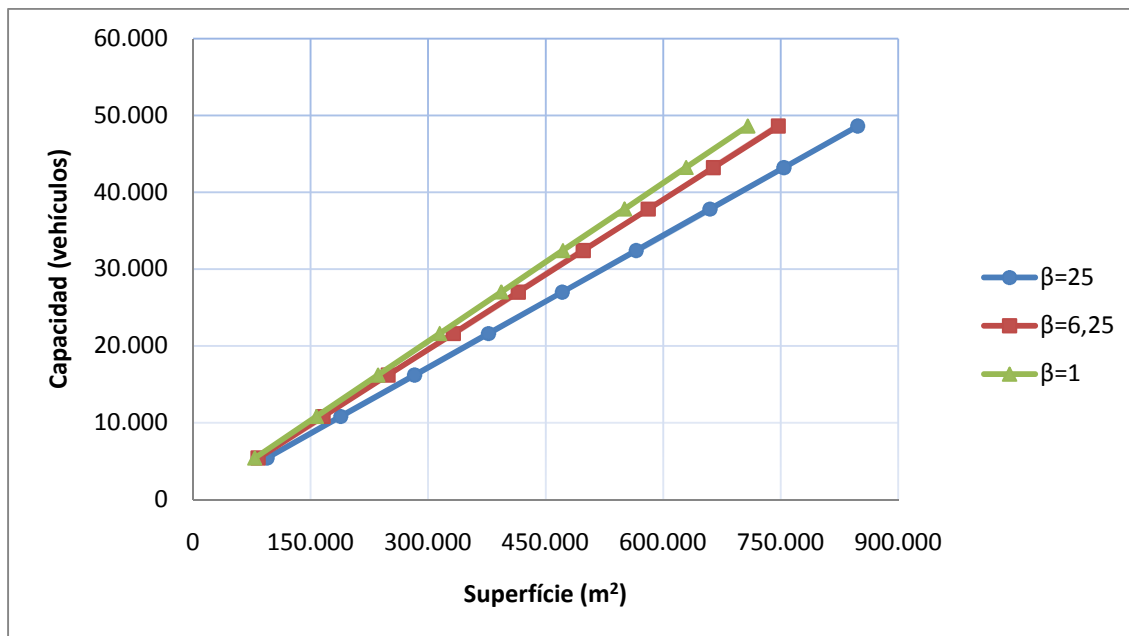
Superficie aparcamiento: 78.680 m<sup>2</sup>



**Figura 7.1** – Resumen de las configuraciones en planta de los bloques de aparcamiento y la necesidad de espacio de cada una de las estrategias propuestas



Analizando los resultados obtenidos para las tres estrategias referidas a la necesidad de suelo portuario para alcanzar la capacidad de diseño impuesta, se representa en la figura 7.2 la relación existente entre la capacidad de la cama y la necesidad de espacio según el parámetro de forma de cada una de las configuraciones en planta.



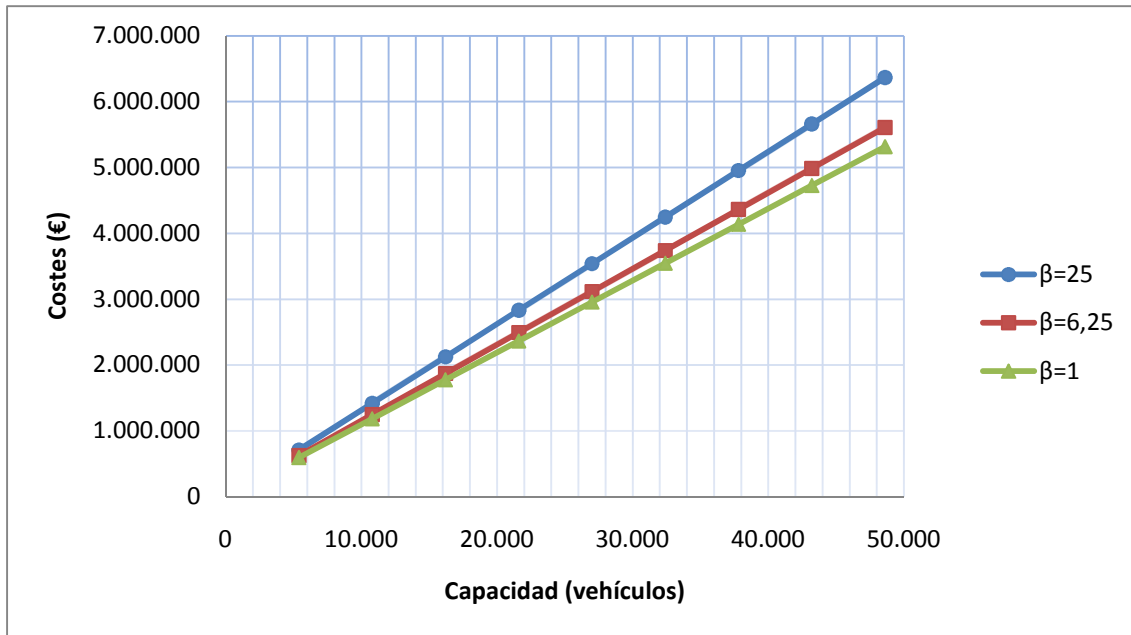
**Figura 7.2** – Relación entre la capacidad de la cama de almacenaje y la superficie utilizada en el puerto

De la figura 7.2, se puede interpretar que dependiendo de las necesidades de capacidad de un operador logístico para su cama de almacenaje, o del espacio disponible en la terminal portuaria, se podrá obtener uno u otro parámetro dependiendo de cuál es la estrategia de aparcamiento que se haya escogido con anterioridad. Tal y como se observa en el gráfico, a mayor capacidad de la cama, aumenta aún más la necesidad de espacio para la configuración 1 de celda, que tiene un parámetro de forma  $\beta=25$ .

Esta necesidad de espacio, también se puede traducir en costes de explotación de la terminal, ya que conocido el valor del suelo portuario (7-8 €/m<sup>2</sup> por año de concesión) se podrá desarrollar una función que valore los costes del suelo dependiendo de la configuración de las celdas que se haya elegido.

En la figura 7.3 se puede observar como a medida que se incrementa la capacidad de la cama, también lo hacen los costes de explotación. Este incremento, igual como sucedía con la superficie (al estar relacionados estos costes con la superficie), también aumentan progresivamente si se decide por utilizar una configuración de las celdas con un parámetro de forma alejado del valor unitario.





**Figura 7.3** – Relación entre los costes de explotación del suelo portuario y la capacidad de la cama de almacenaje

### 7.3 TIEMPO DE ACCESO AL APARCAMIENTO

Una vez conocida cuál es la necesidad de espacio para cada una de las tres estrategias presentadas, es necesario saber a partir del diseño en planta del aparcamiento cuál es el tiempo total que se tarda en acceder a todos los bloques de que dispone cada aparcamiento. Conociendo este valor de tiempo, se tendrá una idea de la accesibilidad de la cama de cada estrategia y de los valores de productividad y necesidad de mano de obra para cada una de ellas.

En este sentido, se ha calculado el tiempo medio de acceso a cada uno de los seis bloques de aparcamiento que conforman la cama de almacenaje tomando la distancia al centro de gravedad del mismo desde el punto de entrada de los vehículos procedentes del buffer de descarga. Para este cálculo se ha considerado una velocidad media de circulación por el interior de la cama de  $v=50 \text{ km/h}$ . A continuación, en la tabla 7.1 se muestran los valores obtenidos de los tiempos de acceso a los seis bloques para cada una de las tres estrategias de aparcamiento consideradas.

Los resultados mostrados anteriormente serán comparados a partir del sumatorio de tiempos de acceso a cada una de los seis bloques, que darán un valor del tiempo total de acceso a la cama ( $t_T$ ). Estos valores reflejan que la segunda estrategia de aparcamiento considerada es la que menor tiempo de acceso necesita para incorporar los vehículos en la cama de almacenaje.

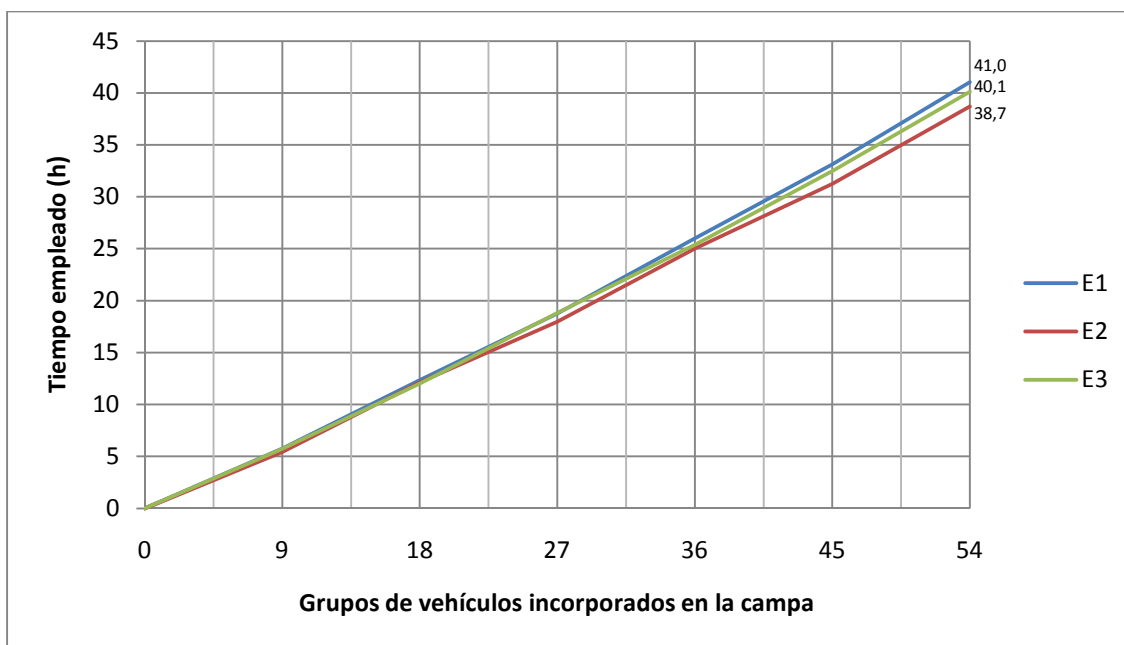
$$t_T = \sum_{i=1}^6 t_i, \quad t_i = \frac{D_i}{v} \quad (7.1)$$



Bloque (i)	ESTRATEGIA 1		ESTRATEGIA 2		ESTRATEGIA 3	
	$D_i$ (m)	$t_i$ (s)	$D_i$ (m)	$t_i$ (s)	$D_i$ (m)	$t_i$ (s)
i = 1	127,5	9,18	76	5,47	121,5	8,75
i = 2	260,5	18,75	279,5	20,12	212,5	15,30
i = 3	239,5	17,24	140	10,08	303,5	21,85
i = 4	372,5	26,82	343,5	24,73	257,5	18,54
i = 5	351,5	25,31	204	14,69	348,5	25,09
i = 6	484,5	34,88	407,5	29,34	439,5	31,64
<b>TOTAL</b>	<b>1836 m</b>	<b>132 s</b>	<b>1450,5 m</b>	<b>104,5 s</b>	<b>1683 m</b>	<b>121 s</b>

**Tabla 7.1** – Resumen de las distancias ( $D_i$ ) en metros y tiempos de acceso ( $t_i$ ) en segundos a cada bloque de aparcamiento ( $i=1,\dots,6$ )

La tabla 7.1 nos aporta los resultados del total de tiempo empleado para acceder a los distintos bloques de aparcamiento. Se puede observar claramente como la estrategia 2 (aparcamiento en cuatro filas) es la que presenta el menor tiempo de incorporación de los vehículos a la campa de almacenaje. Si bien es cierto que el aparcamiento de los vehículos en celda cuadrada es mucho más eficiente y de rápido acceso, la distribución de los bloques en esta estrategia hace reducir los efectos positivos de la misma. En cambio, la reducción del tiempo de acceso a los bloques de la campa para la estrategia 2 es aproximadamente de un 21% respecto a la primera estrategia de aparcamiento en fila doble, y cerca de un 14% respecto a la estrategia 3 de aparcamiento en celda cuadrada.



**Figura 7.4** – Gráfico que muestra el tiempo empleado para incorporar los vehículos en la campa de almacenaje según la estrategia de aparcamiento escogida

Como se puede observar en la figura 7.4, los incrementos de tiempo empiezan a ser importantes cuando se deben incorporar vehículos en el quinto y sexto bloques para las estrategias 1 y 3. En este sentido, es destacable el ahorro en tiempo que



consigue la estrategia 2 de aparcamiento en cuatro filas, llegando a cerca de 1 hora y media respecto a la estrategia 1, ya que el diseño en planta de la campa consigue reducir al máximo los desplazamientos de los conductores hasta los bloques más alejados del muelle. Cabe recordar, que las tres estrategias de aparcamiento han basado su estrategia de localización de vehículos basándose en las consideraciones previas hechas en el capítulo de metodología de evaluación de la modelización.

## 7.4 PRODUCTIVIDAD DE LA MANO DE OBRA

A partir de las evaluaciones temporales realizadas para cada una de las tres estrategias de aparcamiento consideradas como óptimas para una campa de almacenaje, se han podido obtener unos valores de productividad que deben ser comparados para descubrir cuál de las tres estrategias presenta la mejora más significativa para el aparcamiento de los vehículos de importación en el puerto y la disminución más importante de la carga de trabajo impuesta para realizar tales tareas de aparcamiento.

El objetivo de este análisis de productividad reside en determinar cuál de las configuraciones en planta reduce los traslados improductivos de conductores por parte del vehículo que los recoge, una vez realizada la tarea de aparcamiento. Se conoce de las consideraciones previas que cada celda tendrá 100 plazas de aparcamiento, y que existen hasta tres configuraciones en planta distintas para aparcar a los vehículos descargados del mismo buque. Además, se sabe que los conductores actúan en pandillas de 6 conductores (tal y como se ha apuntado en el apartado 5.5 de la modelización) y se pretende que no más de 1 mano de obra, es decir, 6 conductores, realicen una tarea  $k$  de aparcamiento.

De esta forma se pueden particularizar los valores de productividad que habían sido presentados en el capítulo 5. El número de ciclos a realizar para la tarea  $k$  de aparcamiento de vehículos será de:

$$c_k = \frac{L_k}{P_k} = \frac{100}{6} = 16,67 \sim 17 \text{ ciclos} \quad (7.2)$$

El tiempo total de ejecución de la tarea de aparcamiento para el  $k$ -buque que llega al puerto ( $t_k$ ) será:

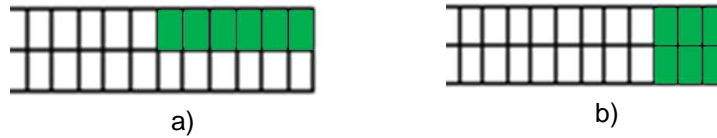
$$t_k = c_k \cdot \varphi_{ij} = 17 \cdot \varphi_{ij} \quad (7.3)$$

donde el valor de productividad ( $\varphi_{ij}$ ) vendrá dado por el tiempo de introducción de los vehículos en cada una de las tres estrategias propuestas, y que se ha valorado en el apartado anterior.

Para todas las estrategias siempre existen dos maneras distintas de aparcar los vehículos cada vez que los conductores realizan un ciclo de aparcamiento.



Dependiendo de la configuración de las celdas, será preferible hacerlo de una manera u otra. Para la estrategia 1 de aparcamiento en doble fila, en la figura 7.5 se presentan las dos posibilidades de aparcamiento que una pandilla de conductores tiene.



**Figura 7.5** – Posibilidades de aparcamiento en una celda de dos filas por parte de los conductores de una pandilla

Parece razonable pensar que será más productivo el aparcamiento de los vehículos de manera que se reduzca la distancia entre el punto de aparcamiento y el punto de recogida de los conductores, que se realizará con un vehículo auxiliar o taxi. La posibilidad de aparcamiento *b)* es la que más reduce la distancia hasta el punto de recogida para esta estrategia, al ser el sumatorio de distancias de las seis plazas de aparcamiento la siguiente para los dos casos:

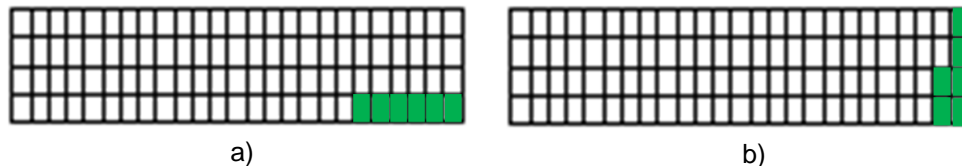
a)

$$D_T = \sum_{i=1}^6 D_i = 45m \quad (7.4)$$

b)

$$D_T = \sum_{i=1}^6 D_i = 22,5m \quad (7.5)$$

La estrategia 2 de aparcamiento también tendrá dos posibilidades de aparcamiento de los vehículos, los cuales a continuación se muestran en la figura 7.6.



**Figura 7.6** – Posibilidades de aparcamiento en una celda de cuatro filas por parte de los conductores de una pandilla

Igual como sucede con la estrategia 1, también existe una colocación de los vehículos para reducir el desplazamiento de los conductores hasta el taxi que los devolverá al buffer de descarga para seguir realizando la tarea de aparcamiento.

a)

$$D_T = \sum_{i=1}^6 D_i = 45m \quad (7.6)$$

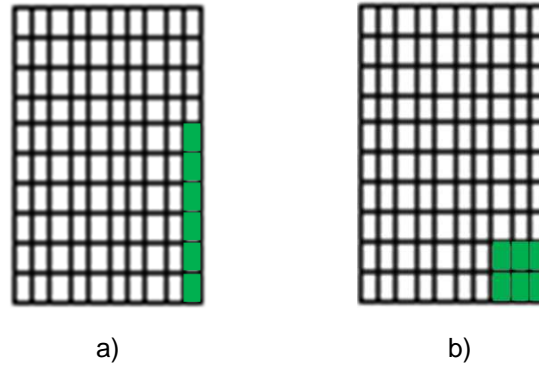
b)

$$D_T = \sum_{i=1}^6 D_i = 23,5m \quad (7.7)$$



Así, se afirma que la estrategia b) de incorporación de los vehículos en la campa es la que más reducción de tiempo aporta para los conductores y repercute positivamente en una mejora de la productividad de las operaciones.

Por último, se analiza la estrategia 3 de aparcamiento en celda cuadrada, donde también existirán dos tipos de localización que afectarán en los valores de productividad tal y como muestra la figura 7.7.



**Figura 7.7** – Posibilidades de aparcamiento en una celda cuadrada por parte de los conductores de una pandilla

Las distancias que deben recorrer los conductores quedan reflejadas a continuación en las fórmulas 7.8 y 7.9:

a)

$$D_T = \sum_{i=1}^6 D_i = 36m \quad (7.8)$$

b)

$$D_T = \sum_{i=1}^6 D_i = 24m \quad (7.9)$$

También se confirma que el aparcamiento compacto usado en la solución b) es el que resulta en una menor distancia en conjunto para todos los conductores, con lo que podrán volver de manera más temprana al buffer de descarga para seguir realizando la tarea de incorporación de vehículos que les ha sido impuesta.



## 7.5 ESTUDIO DE LAS REMOCIONES

Como se ha anunciado a lo largo de todo el estudio, son las recolocaciones de vehículos en el interior de la campa las que preocupan a los operadores logísticos. Estas recolocaciones de vehículos suponen un símbolo de ineficiencia por parte del operador, al no ser cobradas a los clientes que reclaman un cierto número de vehículos para vender en los correspondientes concesionarios.

A continuación se analizarán las remociones tanto internas, aquellas que se deben realizar para conseguir un vehículo en particular, como las remociones externas, aquellas que se realizan para dotar de ciertos espacios libres a la campa de almacenaje para poder realizar nuevas incorporaciones de vehículos con las máximas garantías de productividad al aparcas los vehículos de manera compacta.

### Remociones internas

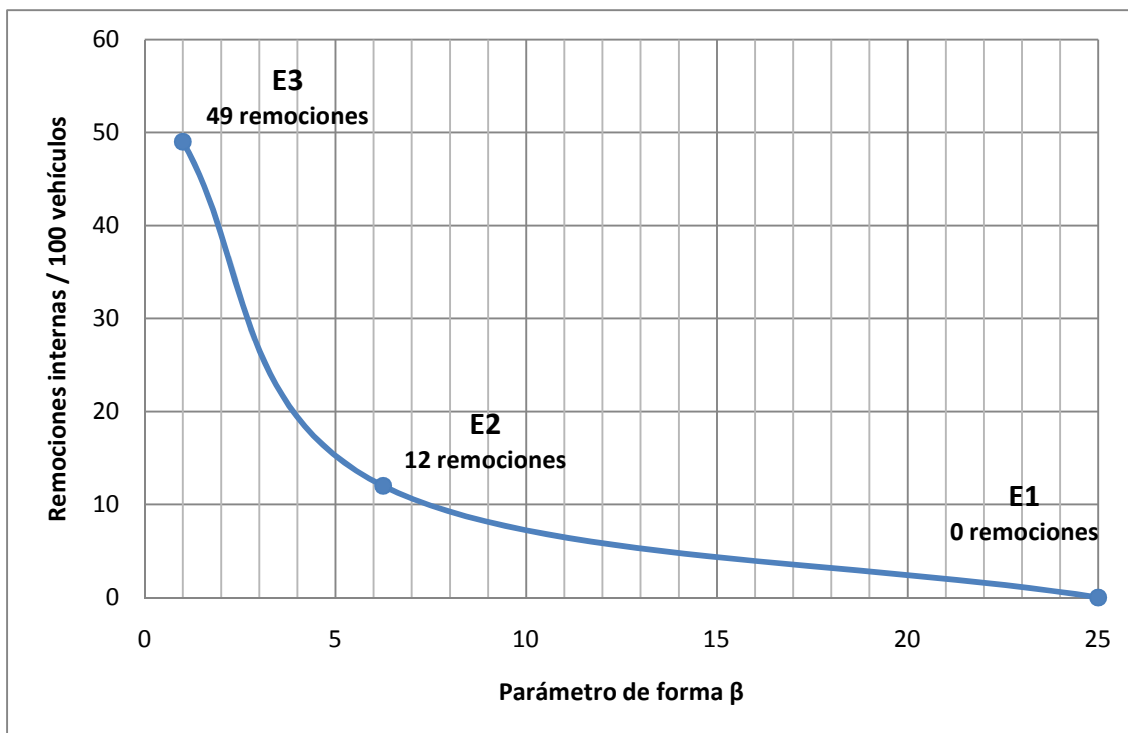
Para cada estrategia, se ha calculado la esperanza de remociones internas en una hilera de vehículos, recordando que solamente se tienen en cuenta los movimientos desde la simetría central que presenta la celda de almacenaje.

Es preciso recordar la teoría de cálculo del número de remociones de una celda. Para determinar la esperanza del número de remociones en un instante determinado de tiempo  $t$ , debe recurrirse a la definición de esperanza. Al tratarse el número de elementos de una variable aleatoria discreta  $\{1, 2, \dots, N-2, N-1\}$ , y sus probabilidades asociadas representadas por las funciones de probabilidad anteriores, la esperanza de remociones en una fila se calcula como:

$$E[R(t)] = \sum_{z=1}^{N-1} z \cdot P_{R=z}(t) \quad (7.10)$$

La esperanza de remociones internas únicamente toma sentido cuando se analizan las estrategias con más de 2 hileras de vehículos, a partir del cual empieza la influencia de la presencia de los vehículos situados hacia los extremos para permitir la liberación de los que se encuentran en el interior de la celda.

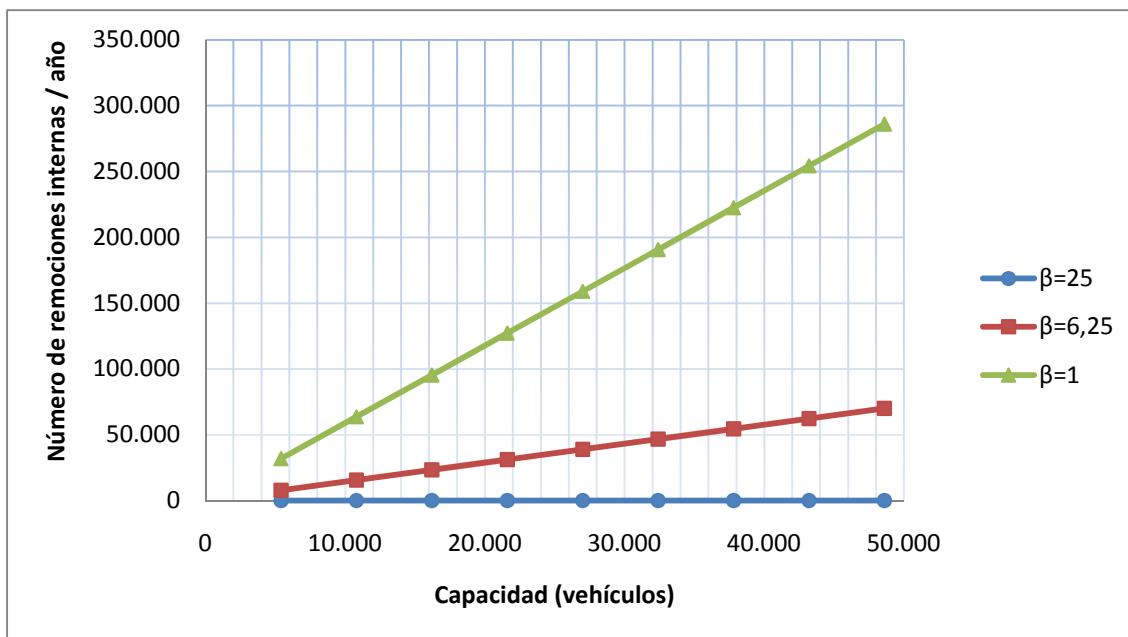
En este sentido, el valor de las remociones internas únicamente responde a criterios de diseño, ya que la influencia del tiempo en estos valores no cobra ningún sentido, siendo el parámetro de forma  $\beta$ , el principal elemento de decisión para reducir o aumentar el valor de las remociones internas. En la figura 7.8 se muestra la relación existente entre las remociones internas de vehículos y el parámetro de forma  $\beta$  anteriormente analizado por cuestiones de capacidad y superficie utilizada en la campa de almacenaje.



**Figura 7.8** – Gráfico que relaciona el número esperado de remociones internas para cada celda de aparcamiento dependiendo del parámetro de forma escogido para el diseño

Como se puede observar en la figura 7.8, a medida que se disminuye el valor del parámetro de forma, es decir, que se compacta más la celda de aparcamiento, aumenta de manera significativa el número esperado de remociones internas a realizar en una celda de aparcamiento. Este simple gráfico nos informa que, al disponer de celdas cuadradas con el mismo número de vehículos por fila que por columna, se espera que se tengan que mover 49 vehículos hasta el vaciado completo de la celda, que variará en función de cuál sea el ritmo de salida  $\mu$  (veh/día·celda) de los vehículos de la campa de almacenaje. Para la configuración de la estrategia 2 de aparcamiento, el número se reduce a tan solo 12 remociones internas esperadas para el mismo volumen de 100 vehículos, hecho que supone una reducción importante en comparación con la estrategia de celdas cuadradas. Como ya se ha enunciado en apartados anteriores, el diseño de celda con dos hileras de vehículos anula cualquier tipo de remoción interna para la retirada de los vehículos de la campa.

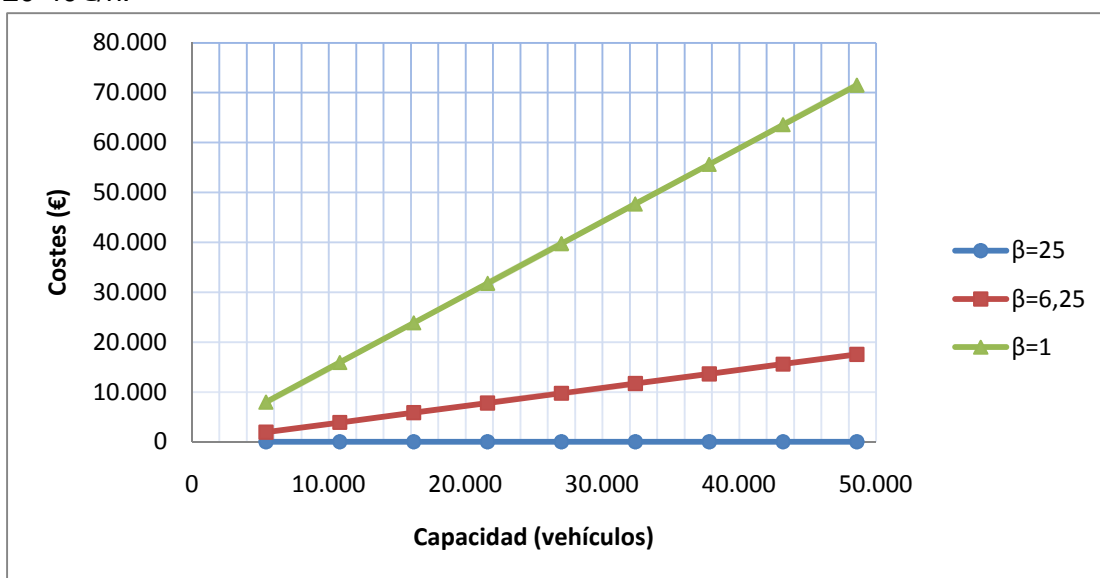
A continuación se presentará la relación existente entre la capacidad de una campa de almacenaje y el número de remociones internas que se prevén anualmente. De esta forma, posteriormente se calculan los costes de explotación derivados de estas operaciones de remoción, que podrán ser comparados con los costes de concesión del suelo portuario anterior, para determinar cuál de las estrategias propuestas aporta el mayor ahorro para el operador logístico. La comparación se ha hecho para un ritmo de salidas de vehículos de la terminal considerado medio ( $\mu=3$  veh/día·celda).



**Figura 7.9** – Gráfico que muestra el número de remociones internas a realizar en una campa de almacenamiento dependiendo de la capacidad y la configuración en planta escogida con  $\mu=3$  veh/día·celda

En la figura 7.9 se puede observar como a media que aumenta la capacidad de la campa de almacenaje, el número de remociones internas a realizar también lo hace y de manera muy significativa para la estrategia 1 de aparcamiento con celdas cuadradas. Por otra parte, el número de remociones a realizar con una estrategia más conservadora como se trata de la estrategia 2 reduce el número de remociones a realizar en un 75% con una capacidad de campa de 40.000 vehículos.

Para evidenciar aún más estos valores, se ha dotado de valor económico a estas remociones. Se ha definido que el tiempo de realización de una remoción se sitúa entorno de los 30 segundos, y que el coste de una mano de obra está entorno los 20-40€/h.



**Figura 7.10** – Gráfico que muestra la relación existente entre la capacidad y el coste asociado a las remociones internas





La figura 7.10 muestra los costes asociados a las remociones internas que se prevén en una campa de almacenaje, según la capacidad que se tenga. Comparando este gráfico con el obtenido anteriormente en la figura 7.3, se puede comprobar que los costes asociados al alquiler de una cierta superficie en una terminal portuaria son muy superiores a los asociados a las remociones internas. No obstante, es preciso apuntar que la estrategia 2 supone una importante reducción de costes de explotación.

### **Remociones externas**

Las remociones externas, al contrario de lo que sucedía con las remociones internas, sí que dependen de los ritmos de llegadas y salidas de vehículos de la terminal. Para cada estrategia se ha hecho un análisis de sensibilidad (variando los valores de los ritmos de llegadas  $\lambda$  y salidas  $\mu$ ) para determinar en qué instante de tiempo se produce la igualdad entre el número de espacios vacíos en la celda auxiliar, que es la primera de ser llenada del bloque, y el número de vehículos esperado en el resto de 8 celdas. Tal y como se apuntaba en la modelización del capítulo 5, se debe haber cumplido la hipótesis de liberación de espacio siguiente:

$$E[H_{i1}(t)] = 800 - \sum_{j=2}^9 E[H_{ij}(t)], \quad \forall i \in (1,6) \quad (7.11)$$

#### **Estrategia 1: Aparcamiento en doble fila**

El primero de los diseños propuestos para la campa de almacenaje es el que presenta un tiempo de incorporación de los vehículos en la campa más elevado, llegando este a 41 horas de trabajo ininterrumpido para conseguir el llenado de los seis bloques que conforman el aparcamiento de 5.400 plazas, tal y como ya se ha anunciado en el análisis del tiempo de acceso hecho anteriormente.

El tiempo empleado para la realización de la tarea de remoción en un bloque es de 119 minutos para recolocar los 90 coches en la celda auxiliar, considerando que estas operaciones se realizan a un velocidad inferior a la utilizada anteriormente por razones de seguridad, siendo esta de 20 km/h. Sabiendo que a lo largo del horizonte temporal considerado se deberán realizar varias operaciones de remoción externa para cumplir con las exigencias de capacidad impuestas y simuladas, el tiempo total empleado para la realización de estas tareas será el que se muestra en la figura 7.11, sabiendo que el horizonte temporal para el que se han hecho los cálculos es de  $t=90$  días.

#### **Estrategia 2: Aparcamiento en cuatro filas**

La segunda estrategia considerada en este estudio es la que presenta un menor tiempo de incorporación de los vehículos desde el buffer de descarga al interior de la campa de almacenaje. Así, esta estrategia permite introducir todos los grupos de vehículos en la campa en 38,7 horas de trabajo. Esta reducción de tiempo respecto a la primera estrategia se debe a una mejor distribución de las celdas de aparcamiento,



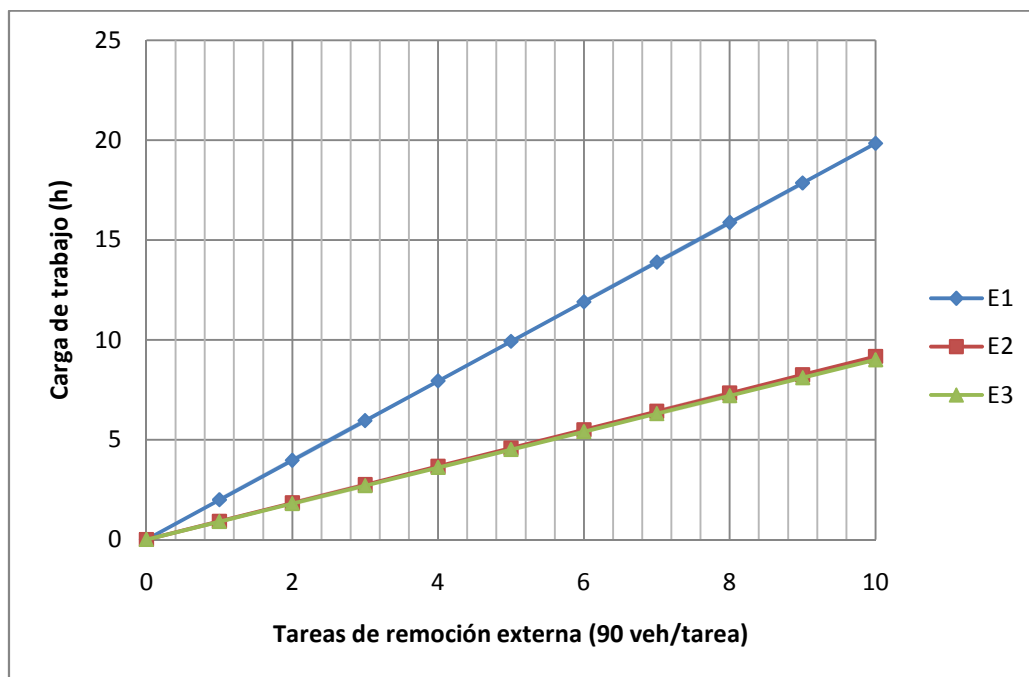
que conformando bloques más compactos reduce el sumatorio de distancia a todos ellos desde el buffer de descarga, hecho que también repercutirá de manera notoria en la reducción del tiempo empleado para realizar las remociones externas. Eso repercutirá beneficiosamente en los niveles de productividad de los conductores.

Gracias a la distribución en planta que facilita la reducción en el tiempo de incorporación de los vehículos, esta reducción también se traduce a la hora de realizar las remociones externas, que se podrán llevar a cabo en 55 minutos. Cabe recordar que cada una de estas tareas de reconsolidación debe incorporar a la celda auxiliar un volumen de 90 vehículos, que ha sido el valor para el cual se ha calculado en el horizonte temporal.

### Estrategia 3: Aparcamiento en celda cuadrada

Al contrario de lo que se preveía en un principio, la tercera estrategia propuesta y, a su vez, la que utiliza el diseño de celda más compacto al tener el mismo número de vehículos por fila que por columna, no es la que mejor productividad obtiene para la incorporación de los vehículos en la campa. Para completar el llenado de los seis bloques de aparcamiento es necesario emplear 40,1 horas, hecho que supone un incremento de casi 1 hora y medio respecto a la estrategia anterior.

El estudio realizado para las remociones externas, referidas a las actividades de reubicación de vehículos para generar suficiente espacio para poder incorporar nuevos paquetes de vehículos en las celdas más cercanas al buffer de descarga y el muelle, aporta que el tiempo empleado para realizar una remoción se sitúa en 54 minutos, valor muy próximo al calculado para la segunda estrategia.



**Figura 7.11** – Gráfico del tiempo empleado en realizar las tareas de remoción externa según la estrategia utilizada



En la figura 7.11 se puede observar como el tiempo que necesitan los conductores para realizar las tareas de recolocación de los vehículos en la celda central para habilitar espacio suficiente para incorporar nuevos grupos de vehículos es parecido para las estrategias 2 y 3, ya que el diseño en planta de las mismas dispone las nueve celdas de manera matricial con tres filas y tres columnas, hecho que repercute positivamente en la disminución de este tiempo. Por otro lado, si bien es cierto que la estrategia 1 no requiere de remociones internas, el tiempo empleado para realizar una tarea de remoción externa es más del doble del necesario para las otras dos estrategias.

### **Análisis de sensibilidad**

Partiendo de la modelización expuesta en el capítulo 5, donde se pretendía estudiar las remociones externas en una campa de almacenaje mediante la evaluación temporal de los modelos de duración, a continuación se presentará un análisis de sensibilidad atendiendo a los diferentes niveles operacionales que se pueden producir en una terminal de vehículos.

En el capítulo 6 anterior, ya se han anunciado cuales serían los ritmos operacionales que se han evaluado, para determinar si una estrategia será preferible cuando los tiempos de liberación de espacio sean inferiores o superiores. Con estos datos, se realizarán tres análisis de sensibilidad de los ritmos de salida de vehículos ( $\mu$ ), habiendo fijado en cada análisis un ritmo de llegadas o intervalo de tiempo fijo entre llegadas de buques ( $\Delta t$ ).

#### **Análisis de sensibilidad 1**

Se tomará como valor fijo un ritmo de llegadas medio, después de haber observado los ritmos operacionales de ciertas terminales portuarias de vehículos. El tiempo entre llegadas de buques a la terminal será de 1 día ( $\Delta t=1$  día), hecho que supondrá la llegada de 100 vehículos a la terminal cada día en que ésta esté operativa.

Con este ritmo de llegadas, y recordando que la capacidad de la campa particularizada en nuestro estudio tiene 54 celdas de aparcamiento, supondrá que a los 54 días de haberse iniciado el llenado de la misma, se llegará a la máxima capacidad. A continuación se determinarán los tiempos en los que se cumple la igualdad apuntada en la fórmula 7.11. Estos tiempos  $t^*$  consisten en el día a partir del cual el número de vacíos existentes en la celda auxiliar central se iguala con el número de vehículos restantes en las 8 celdas colindantes. Parece lógico pensar que el valor de  $t^*$  (tiempo de realización) dependerá directamente de cuál sea el valor del ritmo de salidas.

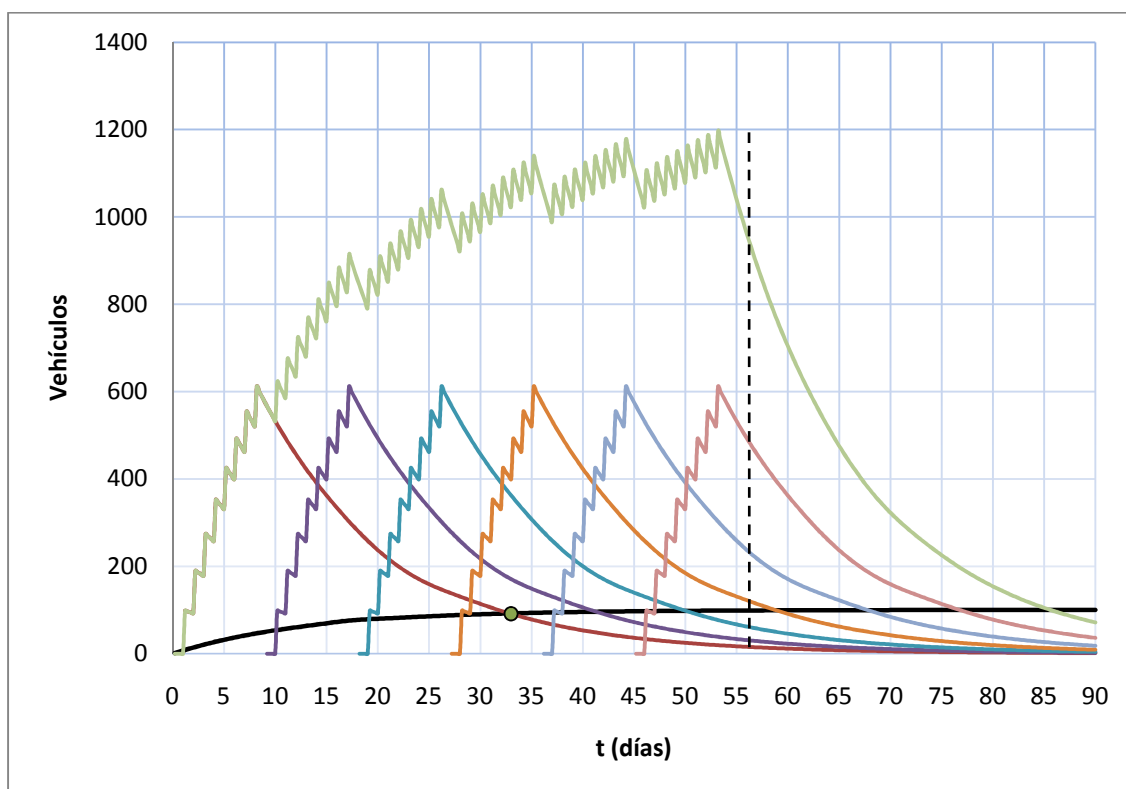
En la tabla 7.2 se muestran los tiempos de realización dependiendo de cuál ha sido el ritmo de llegada impuesto, así como el número de vehículos máximo que ha llegado a albergar un bloque como combinación de los ritmos de llegadas y salidas.



Ritmo de llegadas (Medio)	Ritmo de salidas	Tiempo de realización (días)	Ocupación máxima de bloque
$\lambda = 100$ veh/día	Bajo: $\mu = 2$ veh/día·celda	$t^* = 47$ días	733 (81,4%)
$\lambda = 100$ veh/día	Medio: $\mu = 3$ veh/día·celda	$t^* = 33$ días	665 (73,9%)
$\lambda = 100$ veh/día	Alto: $\mu = 6$ veh/día·celda	$t^* = 19$ días	507 (56,3%)

**Tabla 7.2** – Resumen de resultados obtenidos con el análisis de sensibilidad 1

Como muestran los resultados de la tabla 7.2, a medida que aumenta el ritmo de salidas de la terminal, disminuye el tiempo de realización  $t^*$ , con lo que se podrán realizar las remociones externas antes de que se ocupe por completo la terminal. Con un ritmo bajo de salidas, se obtiene un tiempo de realización de 47 días, hecho que supone que tan solo restarán 7 días antes de tener toda la campa llena de vehículos.



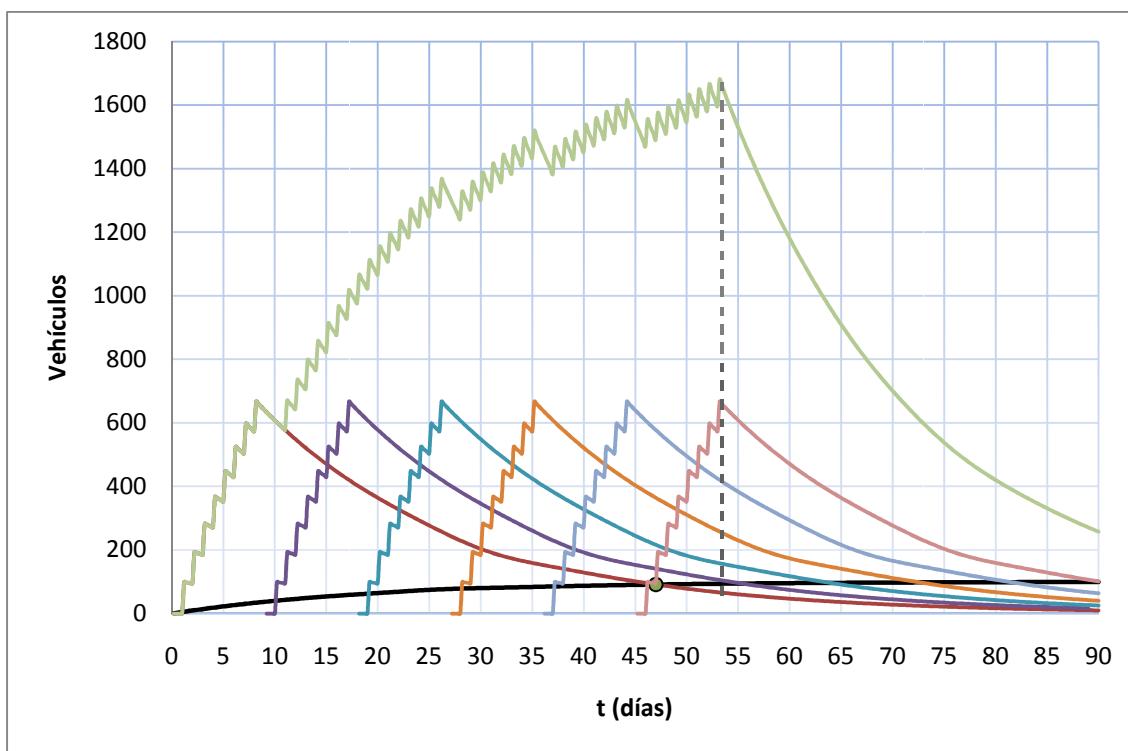
**Figura 7.12** – Gráfico de la evolución temporal de la ocupación de la campa y de los 6 bloques que la forman en un horizonte temporal de 90 días ( $\Delta t = 1$  día,  $\mu = 3$  veh/día·celda)

De la evolución temporal de la ocupación de la campa de almacenaje, se desprende que no se deberán empezar a realizar remociones externas hasta que éstas no sean estrictamente necesarias por falta de espacio. Esto se producirá a partir del día 54 de llenado, donde se deberán reconsolidar 18 vehículos esparcidos por el bloque 1 a la celda auxiliar del mismo bloque, al cabo de 9 días (día 63), se deberán realizar de nuevo 18 operaciones de remoción externa en el bloque 2, y así sucesivamente. En el horizonte temporal presentado (90 días) y con estos ritmos impuestos, se deberán realizar 72 operaciones de remoción externa para esta simulación.



Del análisis de sensibilidad realizado para este primer escenario, se han podido identificar cuál es la evolución del número de remociones externas cuando se varía el ritmo de salidas de la campa de almacenaje. Así, para el mismo ritmo de llegadas, pero aumentando el ritmo de salidas a  $\mu=6$  veh/día-celda se obtiene que la campa de almacenaje no requiere de ninguna remoción externa durante el horizonte temporal estudiado. Asimismo, la ocupación de toda la campa de almacenaje, con capacidad para 5.400 plazas no supera las 650, siendo esto símbolo que la retirada de vehículos de la campa de almacenaje es muy superior al ritmo de llegadas de los buques.

Variando el valor del ritmo de salidas de vehículos de la campa hacia un valor inferior, obteniendo así un ritmo catalogado como bajo ( $\mu=2$  veh/día-celda) se obtiene que se deberán realizar hasta cuatro tareas de remoción externa para poder habilitar espacio suficiente para albergar a los grupos de vehículos que lleguen a partir del día 54. Así, cada tarea de remoción tendrá que reubicar 64 vehículos a la celda auxiliar, siendo el valor total para el tiempo analizado, de 256 operaciones de remoción. Este valor es superior al analizado en la primera configuración operacional al tener el tiempo de realización  $t^*$ , muy cercano a los 54 días ( $t^*=47$  días). Con esta configuración operacional, se consigue tener un ocupación de la campa de 1680 plazas. (Figura 7.13)



**Figura 7.13** – Gráfico de la evolución temporal de la ocupación de la campa y de los 6 bloques que la forman en un horizonte temporal de 90 días ( $\Delta t=1$  día,  $\mu=2$  veh/día-celda)



### Análisis de sensibilidad 2

En este segundo análisis de sensibilidad del nivel operacional de la campa, tal y como se apuntaba en la metodología de evaluación de los ritmos operacionales, el ritmo de llegada de los buques se verá incrementado, llegando 1,67 buques de media al puerto por día ( $\lambda=1,67$  buques/día ;  $\Delta t=0,6$  días), hecho que supondrá la llegada de 167 vehículos a la terminal de media cada día.

Con este incremento en el ritmo de llegadas, y recordando que la capacidad de la campa particularizada en nuestro estudio tiene 54 celdas de aparcamiento, se llenarán las 54 celdas disponibles en 31 días, hecho que supone una reducción de 24 días respecto a los ritmos de llegadas analizados en el primer análisis de sensibilidad de la campa de almacenaje. A continuación se determinarán los tiempos en los que se cumple la igualdad apuntada en la fórmula 7.11. Estos tiempos  $t^*$  consisten en el día a partir del cual el número de vacíos existentes en la celda auxiliar central se iguala con el número de vehículos restantes en las 8 celdas colindantes.

En la tabla 7.3 se muestran los tiempos de realización dependiendo de cuál ha sido el ritmo de llegada impuesto, así como el número de vehículos máximo que ha llegado a albergar un bloque como combinación de los ritmos de llegadas y salidas.

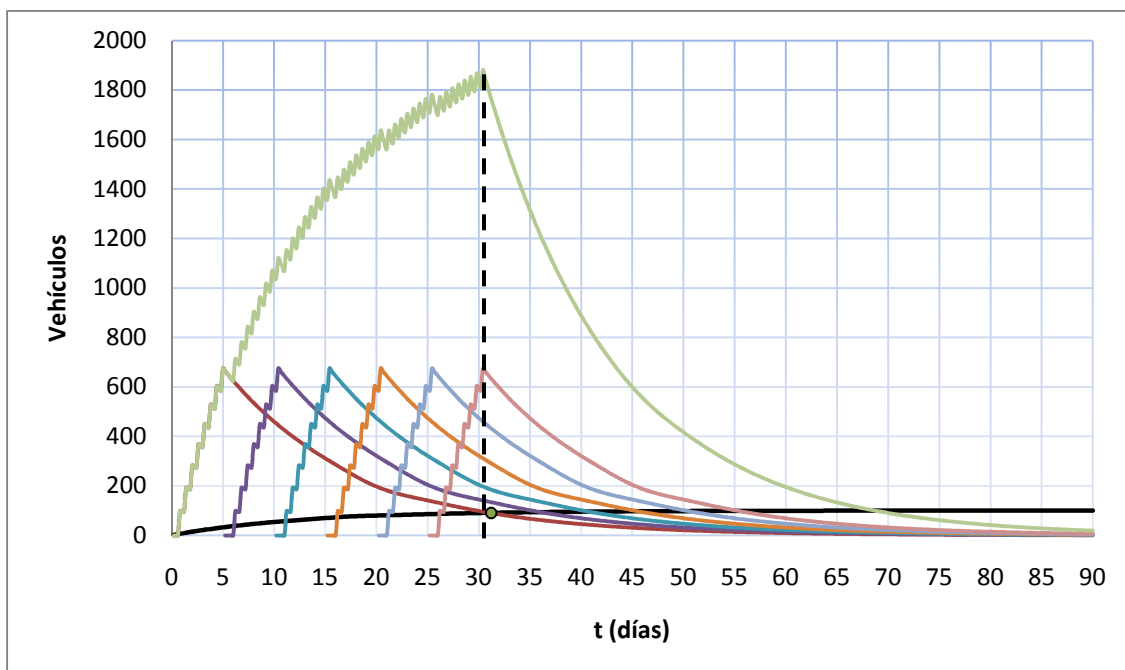
Ritmo de llegadas (alto)	Ritmo de salidas	Tiempo de realización (días)	Ocupación máxima de bloque
$\lambda = 167$ veh/día	Bajo: $\mu = 2$ veh/día·celda	$t^* = 45$ días	790 (87,8%)
$\lambda = 167$ veh/día	Medio: $\mu = 3$ veh/día·celda	$t^* = 31$ días	742 (82,4%)
$\lambda = 167$ veh/día	Alto: $\mu = 6$ veh/día·celda	$t^* = 17$ días	621 (69,0%)

**Tabla 7.3** – Resumen de resultados obtenidos con el análisis de sensibilidad 2

Como muestran los resultados de la tabla 7.3, a medida que aumenta el ritmo de salidas de la terminal, disminuye el tiempo de realización  $t^*$ , igual como sucedía con el primer análisis de sensibilidad. Con un ritmo medio de salidas, se obtiene un tiempo de realización de 31 días, hecho que supone que en la campa se ocuparán todas las celdas disponibles antes de poder realizar las operaciones de remoción correspondientes. Con un ritmo bajo de salidas, se obtiene un tiempo de realización de 45 días, hecho que supone que la campa llegará a su máximo de capacidad y no podrá aceptar vehículos entre los días 32 y 45, cuando se podrán empezar de nuevo a aceptar vehículos al poderse realizar las tareas de remoción externa, impuesta a un máximo de 90 vehículos.

A continuación se analizarán los tres casos con mayor precisión, para determinar el número de remociones externas que se debe realizar en cada una de las situaciones operacionales de la campa y así determinar si existe alguna estrategia que prevalega por encima de las otras.





**Figura 7.14** – Gráfico de la evolución temporal de la ocupación de la campa y de los 6 bloques que la forman en un horizonte temporal de 90 días ( $\Delta t=0,6$  días,  $\mu=3$  veh/día-celda)

Como ya se había apuntado anteriormente, con esta configuración operacional la campa deberá esperar 1 día para poder albergar a más grupos de vehículos, con lo que los buques deberán ser programados para que no lleguen en ese día en que la campa debe realizar las tareas de retirada de vehículos para descongestionarla. Con esta configuración, la ocupación de la campa crece hasta 1.880 plazas de aparcamiento utilizadas en el máximo, producido en el día 31 de haberse iniciado el llenado. Con la configuración de la figura 7.14, se deberán realizar hasta 12 tareas de remoción debido a la congestión que sufre la campa de almacenaje, teniendo que mover un total de 1.080 vehículos por remoción externa.

Para ejemplificar el proceso de llenado, remociones y rellenado que sucede en la campa de almacenaje, se presenta la figura 7.15 con el proceso de llenado (celdas en rojo) y proceso de remoción externa para la estrategia 2 (celdas de cuatro filas) con una configuración temporal de  $\Delta t=0,6$  días y  $\mu=3$  veh/día-celda

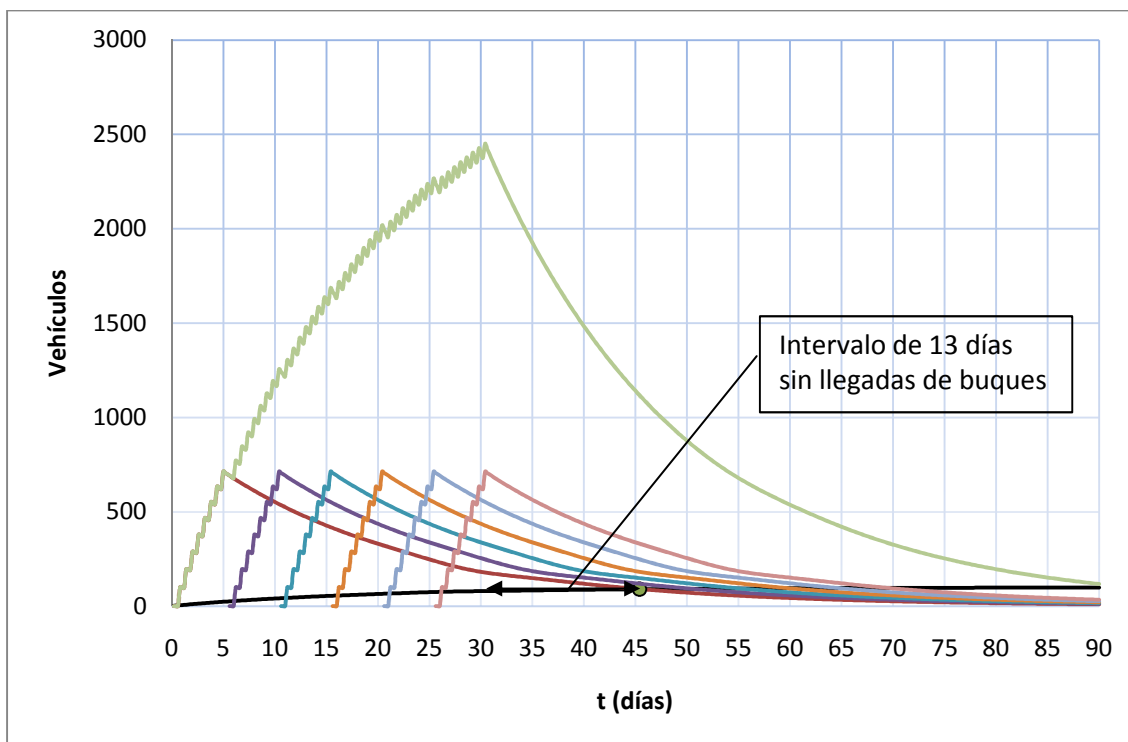


**Figura 7.15** – Planta de la campa de almacenaje con la estrategia 2 durante el proceso de llenado de los bloques (a) y después de haberse realizado la remoción externa en el primer bloque al cabo de 31 días de iniciar la simulación (b)



Variando el ritmo de salida, imponiendo que se entreguen mayor número de vehículos en el buffer de salida PDI ( $\mu=6$  veh/día-celda), también parece razonable pensar que la evacuación de espacio hará reducir los niveles de congestión y, consecuentemente las remociones externas a realizar en la campa de almacenaje. Así, el número de remociones externas a realizar es de 8 vehículos para cada tarea de remoción, habiéndose de realizar hasta 12 tareas de remoción, hecho que supone el movimiento de 96 vehículos en todo el horizonte temporal, con una ocupación máxima de la campa de 1.051 vehículos.

Por último, este segundo análisis de sensibilidad analizará la situación más extrema que se puede dar en una terminal de vehículos, que consiste en combinar un ritmo de llegadas alto ( $\lambda=167$  veh/día), con un ritmo de salidas bajo ( $\mu=2$  veh/día-celda). Tal y como se ha anunciado anteriormente, esto supondrá que la campa de almacenaje sufrirá una situación de congestión, habiéndose de suspender las llegadas de buques durante 13 días. A continuación se analiza el número de remociones que se deben realizar, recordando que se ha impuesto la igualdad de las funciones en un valor medio esperado de 90 vehículos.



**Figura 7.16** – Gráfico de la evolución temporal de la ocupación de la campa y de los 6 bloques que la forman en un horizonte temporal de 90 días ( $\Delta t=0,6$  días,  $\mu=2$  veh/día-celda)

Para poder trabajar con unas mínimas condiciones de operatividad, aunque nos encontremos en una situación de congestión, se deberán llevar a cabo 9 tareas de remoción, con el movimiento total de 810 vehículos. La ocupación máxima de la campa en este escenario es de 2.424 plazas ocupadas, hecho que ha supuesto la congestión anteriormente comentada.





### Análisis de sensibilidad 3

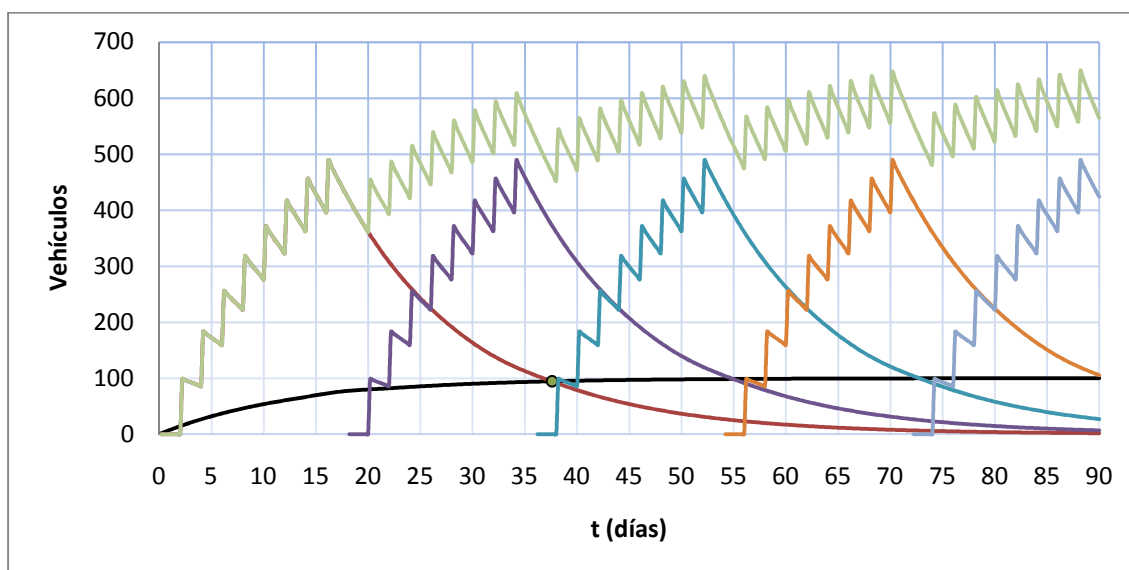
El tercer y último análisis de sensibilidad realizado a los niveles operacionales de la terminal de vehículos pretende aportar cuales son los resultados obtenidos cuando las llegadas de los buques al puerto son más espaciadas en el tiempo. De esta manera, se tendrá que llegará un buque cada dos días al muelle ( $\Delta t=2$  días)

Con esta reducción en el ritmo de llegadas de buques se iniciará el análisis de sensibilidad, sabiendo como dato de partida que las 54 celdas de que dispone la campa analizada no se llegarán a llenar nunca, siendo utilizadas tan solo 45 celdas de aparcamiento en los 90 días de horizonte temporal. Este hecho ya nos predispone a recibir unos resultados en los que se prevé que no se tengan que realizar ningún tipo de remociones externas, ya que los operadores logísticos prefieren albergar los vehículos en celdas vacías más alejadas del muelle a tener que realizar remociones externas no remuneradas económicamente.

En la tabla 7.4 se muestran los tiempos de realización dependiendo de cuál ha sido el ritmo de llegada impuesto, así como el número de vehículos máximo que ha llegado a albergar un bloque como combinación de los ritmos de llegadas y salidas.

Ritmo de llegadas (bajo)	Ritmo de salidas	Tiempo de realización (días)	Ocupación máxima de bloque
$\lambda = 50$ veh/día	Bajo: $\mu = 2$ veh/día·celda	$t^* = 52$ días	606(67,3%)
$\lambda = 50$ veh/día	Medio: $\mu = 3$ veh/día·celda	$t^* = 38$ días	516 (57,3%)
$\lambda = 50$ veh/día	Alto: $\mu = 6$ veh/día·celda	$t^* = 24$ días	340 (37,8%)

**Tabla 7.4** – Resumen de resultados obtenidos con el análisis de sensibilidad 3



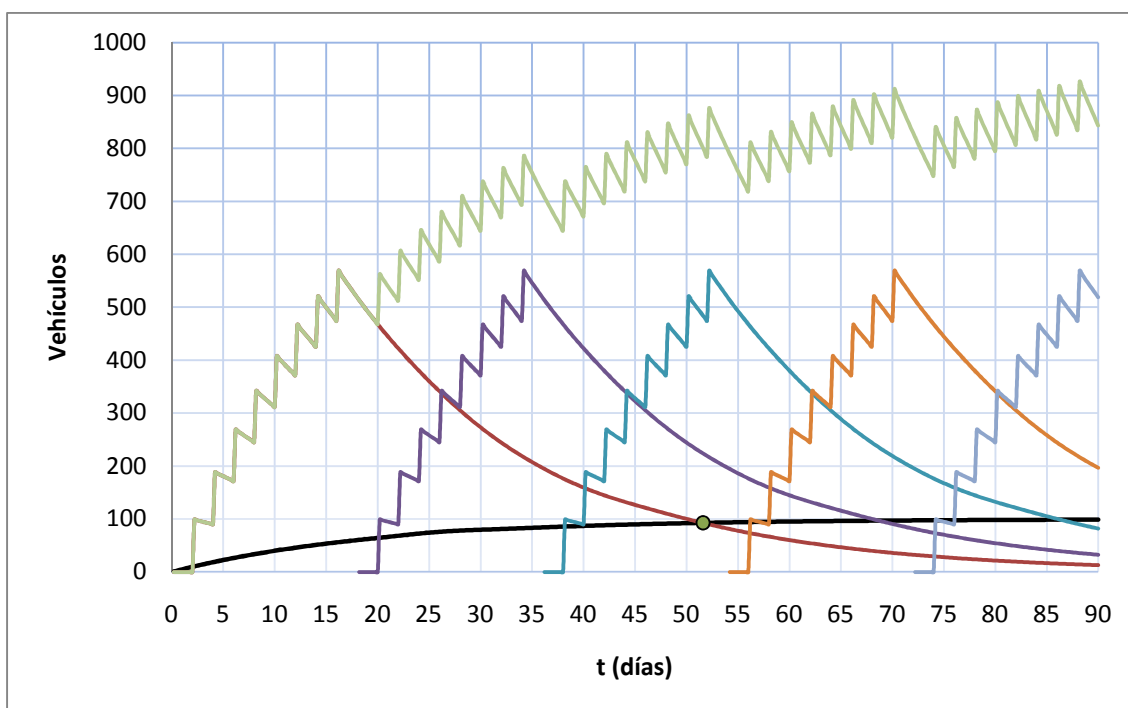
**Figura 7.17** – Gráfico de la evolución temporal de la ocupación de la campa y de los 6 bloques que la forman en un horizonte temporal de 90 días ( $\Delta t=2$  días,  $\mu=3$  veh/día·celda)



En la figura 7.17 se observa como la ocupación de la campa es casi igual a la de un bloque, hecho que sucede debido al bajo ritmo de llegadas de vehículos a la campa de almacenaje. Así, la ocupación máxima de la campa se sitúa en 646 vehículos, de las 5.400 plazas de que se dispone, lo que supone un 12% de plazas ocupadas en el instante con mayor número de vehículos.

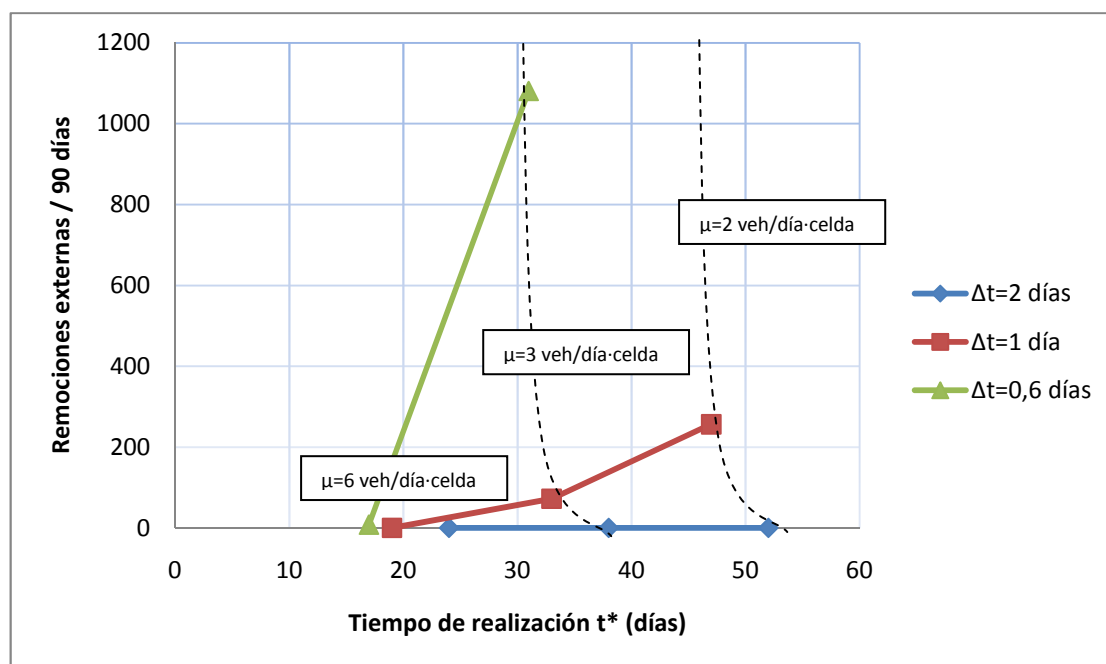
Aumentando el ritmo de salidas ( $\mu=6$  veh/día·celda) de la campa, se consigue reducir todavía más la ocupación máxima de la campa, siendo esta de 355 plazas ocupadas en el instante de mayor congestión, hecho que supone tan solo la utilización de un 6,6% de las plazas disponibles.

En cambio, cuando se reduce el ritmo de salidas a un nivel bajo ( $\mu=2$  veh/día·celda), la ocupación de la campa se sitúa en 926 plazas y se tiene la evolución temporal de los bloques que se muestra en la figura 7.18.



**Figura 7.18** – Gráfico de la evolución temporal de la ocupación de la campa y de los 6 bloques que la forman en un horizonte temporal de 90 días ( $\Delta t=2$  días,  $\mu=2$  veh/día·celda)

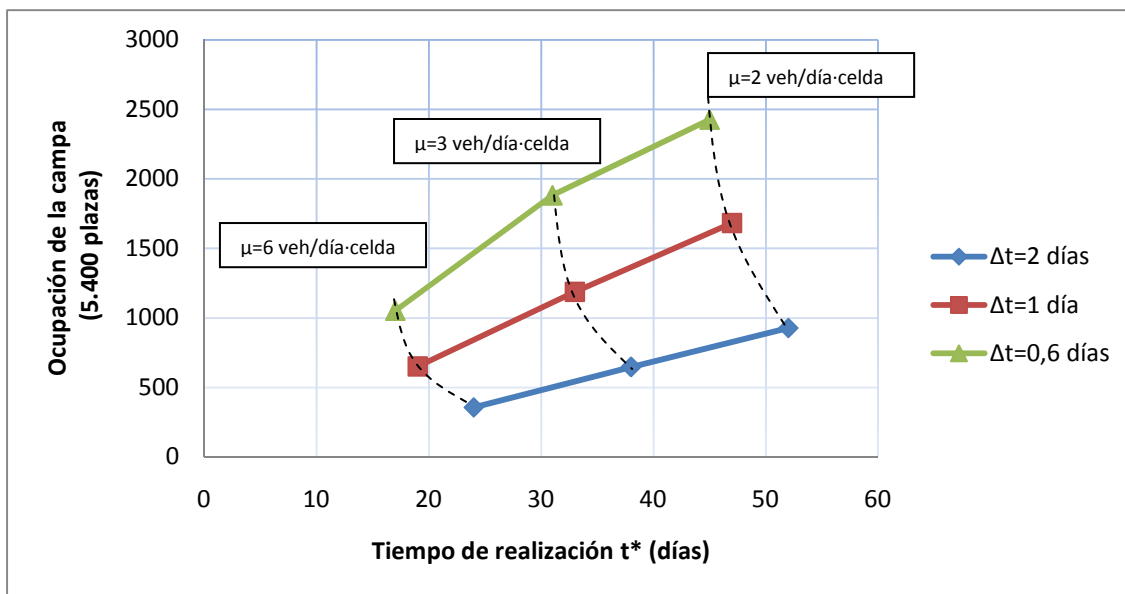
A continuación se pretende sintetizar los resultados obtenidos para poder encontrar una relación entre los tiempos de realización encontrados para cada evaluación temporal de la campa de almacenaje y el número de remociones externas a realizar. Posteriormente, también se quiere determinar si el factor de ocupación máxima de la campa puede ser un indicativo de remociones externas para el operador logístico que desconozca el valor del tiempo de realización  $t^*$ . Estas comparaciones pueden observarse en las figuras 7.19 y 7.20 que siguen a continuación en el estudio.



**Figura 7.19** – Relación entre el número de remociones externas realizadas en una campa por unidad de tiempo y el tiempo de realización  $t^*$  en días para los niveles operacionales considerados

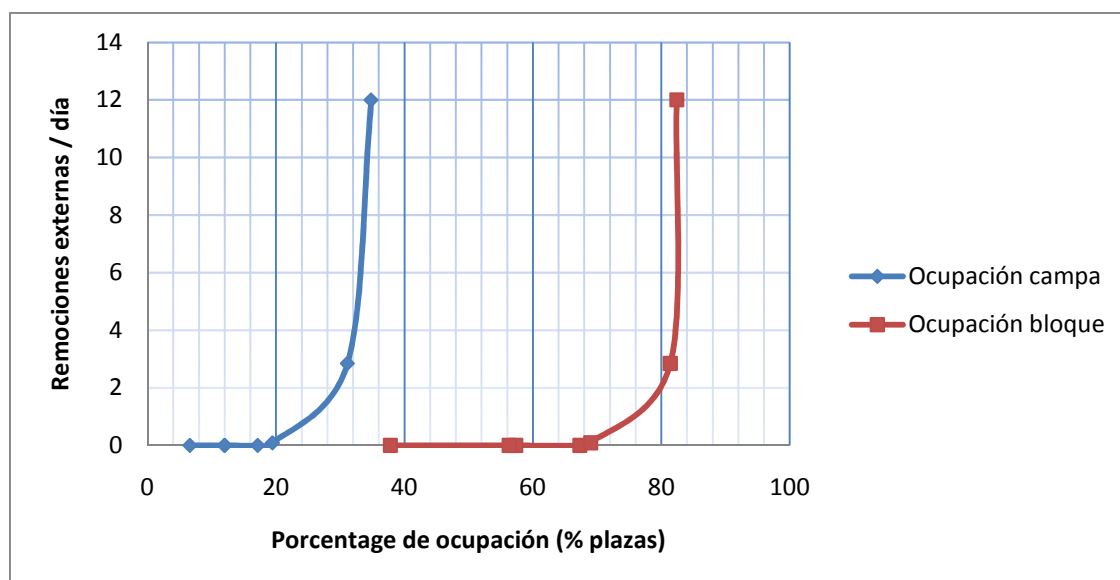
La figura 7.19 muestra la relación que existe entre el número de remociones externas a realizar en una campa de almacenaje y el tiempo de realización  $t^*$ , que es el número de días hasta que no se pueden empezar a realizar remociones. Dependiendo de los niveles operacionales, que quedan representados en el gráfico, se prevé un mayor o menor número de remociones. Así, para un ritmo de salidas elevado no se tendrá que realizar ninguna tarea de remoción, mientras que cuando se tiene un ritmo de salida de vehículos bajo, este número se ve incrementado hasta las 1080 remociones en el horizonte temporal de 90 días. Este valor, supone el límite de remociones que se pueden realizar, tal y como queda graficado en la misma figura que no cobra sentido, al haber parado la actividad en la terminal para esa configuración operacional, tal y como se ha detallado en el análisis de sensibilidad anterior. También es destacable que fijando un ritmo de salidas, a mayor ritmo de llegadas de buques, el tiempo de realización disminuye y se deben realizar mayor número de remociones.

Para poder programar de manera exhaustiva las tareas a realizar en una terminal de vehículos se podrá usar la figura 7.20. Esta figura determina los tiempos de realización  $t^*$  a partir de los cuales se podrán realizar las tareas de remoción, partiendo de los datos sabidos de ocupaciones máximas en la campa y ritmos operacionales de llegada y salida de vehículos de la campa de almacenaje. La determinación de estos tiempos de realización favorecerá de manera considerable la operatividad de la terminal, al asignar las tareas sabiendo cuando será posible realizar estas remociones externas, tiempos  $t^*$  que en principio no son conocidos de antemano por el operador logístico.



**Figura 7.20** – Relación entre la ocupación máxima de una campa de almacenaje de 5.400 plazas disponibles y el tiempo de realización  $t^*$  en días para los niveles operacionales considerados

Finalmente, también será de gran ayuda para el operador logístico de la terminal el determinar a partir de que ocupación máxima de la campa de almacenaje o de un bloque se tendrán que empezar a realizar tareas de remoción externa. De esta manera, también éstas serán programables de antemano y evitarán cualquier situación de imprevisión de las tareas a realizar en una jornada laboral.



**Figura 7.21** – Relación entre el porcentaje de ocupación máxima de campa y bloque, y el número de remociones externas a realizar por unidad de tiempo (1 día)

La figura 7.21 aporta los datos suficientes como para afirmar que a porcentajes mayores de ocupación máxima de la campa del 35% se producirá una situación de congestión que hará que no se puedan recibir más vehículos en la misma. Entre un 20% y un 35% de ocupación máxima se podrá operar en la terminal, sabiendo que se tendrán que realizar tareas de remoción externa.



### **Análisis comparativo de estrategias de localización**

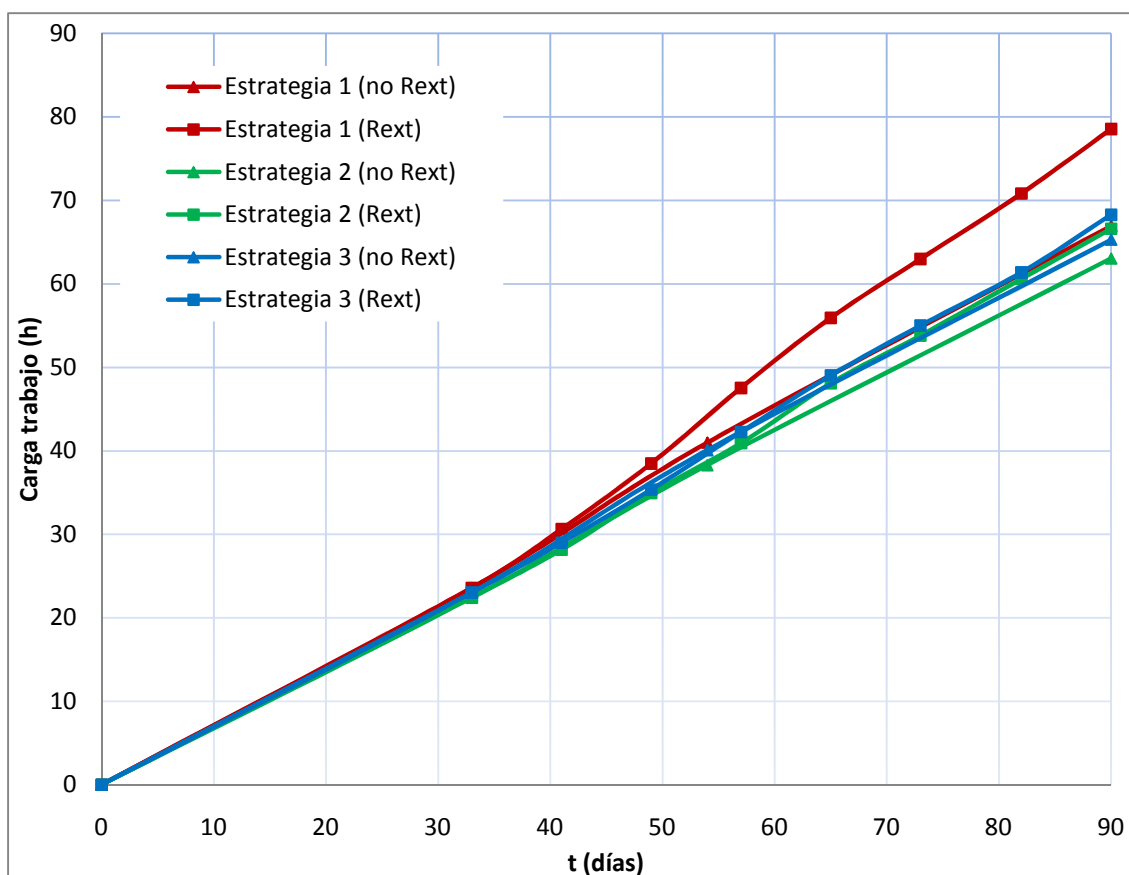
Para analizar con suficiente precisión cuál de las tres estrategias propuestas responde mejor a las necesidades del operador logístico y a las restricciones del lugar de almacenaje, se proponen realizar un estudio comparativo de productividad según la estrategia escogida. Para realizar tal comparativo se ha analizado la primera de las simulaciones realizadas (ritmo de llegadas de 100 veh/día y ritmo de salidas 3 veh/día·celda).

Se comparará el volumen de trabajo necesario para completar las tareas de aparcamiento de los vehículos según si se desea realizar tareas de remoción externa o se prefiere aparcar los vehículos más lejos del muelle, sin necesidad de realizar ninguna tarea de recolocación. De esta forma se descubrirá qué decisión es preferible tomar por parte del operador logístico, una vez se haya escogido la configuración en planta que mejor se adapte a los condicionantes de espacio de la campa, expuestos en apartados anteriores dependiendo del parámetro de forma  $\beta$  de cada tipo de celda.

Si la estrategia escogida es la primera de las tres propuestas (aparcamiento en doble fila), hecho que supondrá la anulación de cualquier remoción interna para conseguir los vehículos a entregar, se deberá apostar por un aparcamiento evitando las recolocaciones de vehículos, ya que estas suponen un incremento considerable de la carga de trabajo por parte de los conductores contratados comparado con el aparcamiento en los bloques más alejados del muelle.

En caso de escoger la segunda estrategia de aparcamiento como la válida para la campa de almacenaje, al tener ciertas restricciones de espacio en el puerto, se deberá evitar en la medida de lo posible las recolocaciones de vehículos (remociones externas), siendo la variación entre la carga de trabajo sin remociones muy parecida a si se deben realizar por motivos de espacio. En caso de no ser necesarias, es preferible aparcar los vehículos lejos del muelle antes de realizar tareas de remoción. Cabe sumar a estas cargas de trabajo, las tareas de remoción interna a realizar al tener hasta cuatro hileras de vehículos, teniendo que realizar hasta 12 tareas de remoción interna por cada 100 vehículos en el peor de los casos considerados, donde todos los vehículos son de distinto modelo y tipo, y sin considerar el vaciado temporal de la celda en cuestión, que reducirá considerablemente este valor.

Por último, si la estrategia de aparcamiento escogida para la campa es la tercera (aparcamiento en celda cuadrada) debido a fuertes restricciones de espacio en el puerto, también será preferible reducir al mínimo posible el número de tareas de remoción externa a realizar, siendo la diferencia de carga de trabajo muy cercana entre realizar estas tareas de remoción o no realizarlas. Cabe apuntar, que al escoger esta tercera estrategia de aparcamiento, se deberá sumar una importante carga de trabajo a la hora de entregar los vehículos a los clientes, al tenerse que realizar varias remociones internas (recolocación de vehículos para acceder al deseado), que en el peor de los casos puede llegar a ser de 49 movimientos de vehículos por cada celda.



**Figura 7.22** – Gráfico comparativo de la carga de trabajo de aparcamiento según se realicen o no remociones externas para cada una de las tres estrategias de aparcamiento propuestas

Del análisis de la figura 7.22 se desprende que la máxima carga de trabajo se da en el caso de tener una configuración en planta con la estrategia 1 y realizando tareas de remoción externa. Por el contrario, la menor carga de trabajo se consigue utilizando la estrategia 2 de aparcamiento y sin necesidad de realizar tareas de remoción. No obstante, si estas tareas de remoción no son evitables por falta de capacidad, es preferible seguir usando la estrategia 2 por delante de la estrategia 3, ya que aparte de tener menor carga de trabajo también se deberán realizar menor número de remociones internas. Así, la estrategia 3 únicamente será preferible cuando las restricciones de espacio en la campa de almacenaje sean muy importantes.

## **CAPÍTULO 8**

---

### **CONCLUSIONES**



El presente estudio se ha centrado en la optimización de las actividades que se producen en el subsistema de almacenaje de las terminales de almacenamiento de vehículos en las zonas portuarias. Más concretamente, el análisis ha querido centrarse exclusivamente en la repercusión de las estrategias de aparcamiento en los vehículos de importación.

El principal objetivo que se pretendía con la realización de este estudio era el de encontrar una estrategia de aparcamiento que resultara óptima para el operador logístico en lo que a utilización de espacio y mano de obra se refiere. Para poder ofrecer al operador de la terminal una estrategia de aparcamiento de los vehículos eficaz, inicialmente se ha tenido que concretar el problema mediante la división de la terminal en varios subsistemas, siendo el subsistema de almacenaje el que se ha analizado con mayor profundidad. El subsistema de almacenaje se encuentra en el punto medio de la cadena de importación, siendo el subsistema de descarga y el de entrega los dos que lo flanquean en el horizonte temporal. Es en este subsistema objeto del estudio, donde se producen las tareas de incorporación, recolocación de vehículos y retirada de los mismos de la campa de almacenaje.

Para analizar con precisión las tareas de aparcamiento y recolocación de vehículos en el interior de la campa de almacenaje, se ha propuesto la modelización de la localización de vehículos. Esta modelización consistía en agrupar los grupos de vehículos que llegaban al puerto en bloques capaces de albergar hasta 9 llegadas consecutivas. Para facilitar el análisis, se simplificaron las llegadas haciendo que cada una de ellas descargara el mismo número de vehículos en el buffer de descarga, que posteriormente se aparcaban en una misma unidad de aparcamiento llamada celda, con plazas de aparcamiento siempre perpendiculares al muelle. Así, cada bloque de aparcamiento disponía de 9 celdas de aparcamiento, que conformaban 900 plazas de aparcamiento. Con la misma modelización también se interpretó que era necesario disponer de una celda auxiliar o de reconsolidación en el centro de gravedad del bloque para facilitar las posibles actividades de recolocación de vehículos (remociones externas), una vez hubiera empezado el vaciado del bloque en cuestión. De esta forma, la liberación de espacio dejaría 8 de las 9 celdas disponibles para realizar nuevas incorporaciones de vehículos lo más cerca del muelle posible, reduciendo el tiempo de incorporación de los vehículos y, a su vez, la carga de trabajo para los conductores responsables de tal tarea. Para determinar el instante de tiempo a partir del que se podían realizar las tareas de remoción externa ( $t^*$ ) se utilizó toda la teoría expuesta por los modelos de duración de Hazard, determinando para cada instante de tiempo la probabilidad de huecos libres en la celda auxiliar y vehículos presentes en las 8 celdas restantes, hasta conseguir la igualdad de ambas expresiones.

A continuación, se definieron varias configuraciones de aparcamiento, así como varios niveles operacionales de la terminal. Partiendo de las hipótesis de evaluación, que acotaron el problema a un número de plazas de aparcamiento determinado en la terminal (5.400 plazas distribuidas en 6 bloques de 9 celdas cada uno de ellos), se configuraron tres tipos de celdas y bloques distintos para ver cuál de ellos respondía mejor a las necesidades del operador.





Una vez caracterizada la campa de almacenaje mediante los distintos diseños de configuración, se definieron los ritmos operacionales más habituales en las terminales de vehículos para analizar cuál era la evolución temporal de la ocupación y las remociones externas en cada instante de tiempo. Se impuso también un horizonte temporal de 90 días para analizar cuál era esta evolución temporal. Se definieron tres ritmos de llegadas de vehículos por vía marítima (bajo:  $\lambda=50$  veh/día, medio:  $\lambda=100$  veh/día, alto:  $\lambda=167$  veh/día) y tres ritmos de salidas por vía terrestre (bajo:  $\mu=2$  veh/día·celda, medio:  $\mu=3$  veh/día·celda, alto:  $\mu=6$  veh/día·celda).

A tenor de los resultados obtenidos en las distintas simulaciones realizadas, se presentan las siguientes conclusiones para facilitar la toma de decisiones de los operadores logísticos de terminales portuarias de vehículos:

- **Análisis de espacio:** La ocupación de espacio en el puerto se reduce en un 20% con la utilización de la estrategia 3 (aparcamiento en celda cuadrada), considerando igualdad de capacidad con la estrategia 1 (aparcamiento en dos filas). Esto se traduce en importantes ahorros para una terminal de vehículos, ya que el precio de concesión del suelo portuario es elevado. Así, una terminal con una capacidad aproximada de 40.000 plazas de aparcamiento le supondrá ahorrar unos 820.000€ anuales la utilización de la estrategia 3 de aparcamiento frente a la 1. Por otra parte, la utilización de la estrategia 2 (aparcamiento en cuatro filas) supone una reducción del 14% respecto a la estrategia 1, hecho que supone un ahorro de aproximadamente 590.000€ teniendo la misma capacidad de 40.000 plazas. A medida que aumenta la capacidad de la campa, también lo hace la utilización del espacio y sus costes de manera lineal.
- **Análisis del tiempo de acceso al aparcamiento en campa:** Si el ritmo de llegadas de buques supone el ritmo más restrictivo de todos, es necesario desalojar con celeridad el espacio destinado a la descarga de los vehículos. Así se pretenderá realizar un aparcamiento de los vehículos en el menor tiempo deseado, hecho que se consigue con la estrategia 2.
- **Análisis de la productividad de la mano de obra:** A tenor de los resultados presentados en el capítulo anterior, se prefiere aparcar cada grupo de vehículos conducidos por la pandilla de conductores (habitualmente 6 conductores) de manera compacta para reducir la distancia que los conductores deben andar hasta el taxi que los devuelve a la zona de descarga. La reducción de distancia es muy similar para los tres diseños de celdas propuestos, hecho que no influirá en la decisión final.
- **Estudio de las remociones:**
  - **Remociones internas:** Si el ritmo más restrictivo de todos es el de las salidas, será necesario realizar las tareas de entregar con la máxima eficacia, hecho que se consigue con la estrategia 1 de aparcamiento. Esta estrategia evita la realización de tareas de remoción interna al no tener que mover ningún vehículo para acceder al deseado. No obstante, si se analizan los costes que supone realizar tareas de remoción interna



se ve que son muy inferiores a los costes de utilización de espacio portuario, con lo que será preferible apostar por una estrategia en la que prevalezcan los costes de espacio a los de remoción interna. En este sentido, para una campa de capacidad aproximada de 40.000 plazas, los costes anuales de remoción interna para la estrategia 2 son de 14.000 € aproximadamente con respecto a los 60.000 € de la estrategia 3, que supone un incremento del 75% en el coste de la tercera estrategia respecto a la segunda.

- Remociones externas: Se han analizado una amplia variedad de ritmos operacionales para determinar unas gráficas experimentales que ayuden a los operadores logísticos a prever situaciones de congestión en la campa de almacenaje. En este sentido, se puede concluir que cuando se supera el 35% de la ocupación total de la campa de almacenaje (se entiende como ocupación máxima que se alcanza en un instante concreto del horizonte temporal) o el 82% de la ocupación total de un bloque, el número de remociones externas a realizar se incrementa de manera muy importante, haciendo inviable su operatividad. Esta situación límite supone que la terminal no puede aceptar más vehículos y debe esperar a que se vacíen ciertas celdas para introducir nuevos vehículos.

De las conclusiones que se han podido obtener de las evaluaciones realizadas, se desprende que aquellos operadores logísticos que dispongan de terminales con suficiente espacio, deben potenciar la utilización de la estrategia 1 de aparcamiento (aparcamiento en doble fila) para evitar el tener que realizar tareas de remoción interna para la entrega de los vehículos. Pero, si estos operadores detectan que la ocupación máxima de la campa se sitúa entre un 20 y un 35% de su capacidad, hecho con el que aumentan considerablemente las posibilidades de tener que realizar tareas de remoción externa, deben pensar en reordenar la campa de almacenaje con la utilización de la estrategia 2 de aparcamiento, que potencia la disminución del tiempo utilizado para realizar tales tareas de recolocación.

Por otra parte, esas terminales portuarias que dispongan de espacios reducidos cercanos al puerto, deben analizar cuál de las dos estrategias compactas (2 o 3) es la más adecuada para sus necesidades, partiendo de la base que será con alguna de estas dos con las que conseguirán mejores rendimientos de capacidad y aceptación de buques para descargar vehículos. Cuanto más restrictivo sea el espacio de la terminal, más peso tomará la opción de la estrategia 3, mientras que si la restricción de espacio no es excesiva, la estrategia 2 será la más recomendable al ser la que menor tiempo emplea para incorporar los vehículos, menor número de remociones internas deberá realizar y tarda prácticamente el mismo tiempo que la estrategia 3 para realizar la tarea de remoción externa, consistente en la reconsolidación de los vehículos en la celda auxiliar o central.



### **Futuras investigaciones**

Este estudio ha centrado todos sus esfuerzos en capacitar a los operadores logísticos en lo que a diseño de celdas se refiere. Con la propuesta de tres tipos distintos de diseño de celda para aparcar los vehículos, que conllevan unas características específicas en cada caso, se han diseñado tres configuraciones en planta distintas. Estas configuraciones han supuesto un aprovechamiento del espacio y una productividad de la mano de obra distinta para cada caso. Así, es preciso mencionar que como futuros desarrollos a la modelización realizada en este estudio sería preciso encaminar la investigación hacia otros tipos de diseño de bloques, variando el número de celdas que se disponen en cada bloque o cambiando su disposición en planta. Una vez analizadas las ventajas y las flaquezas de cada uno de los tres diseños de celda propuestos, sería preciso determinar si una disminución del número de celdas por bloque (2, 4 o 6) o una distinta ubicación de la celda auxiliar (situada en un extremo del bloque o compartida con varios bloques) reduciría la carga de trabajo (disminución de remociones) a realizar por los grupos de conductores contratados.

Por último, se quiere apuntar que también sería recomendable que las evaluaciones temporales fueran evaluadas a nivel práctico para poder corroborar si la metodología aquí aportada queda representada en la realidad de las terminales portuarias de vehículos

---

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



- Amasaka, K. (2002). *New JIT: A new management technology principle at Toyota*. International Journal of Production Economics, Volume 80.
- Bingle, R., Meindertsma, D., Oostendorp, W. (1987). *Designing the optimal placement of spaces in a parking lot*. Mathematical Modelling, Volume 9, Issue 10, pp. 765-776. Calvin College, Grand Rapids, MI 49506, USA.
- Cassady, C.R., Kobza, J.E. (1998). *A probabilistic approach to evaluate strategies for selecting a parking place*. Transportation Science, 32, pp. 30-42.
- Castilho, B.D., Daganzo, C.F. (1993). *Handling strategies for import containers at marine terminal*. Transportation Research B, 27B, pp. 151-166.
- Fischer, T., Gehring, H. (2005). *Planning vehicle transshipment in a seaport automobile terminal using a multi-agent system*. European Journal of Operational Research, Volume 166, pp. 726-740.
- Gil, C. (2007). *Definición de los niveles de servicio de las terminales portuarias*. Tesina de especialidad ETSECCPB – UPC, 2007.
- Henesey, L.E. (2004). *Enhancing container terminal performance: a multi-agent systems approach*. Licenciate Thesis. Department of Systems and Software Engineering, Blekinge Institute of Technology, Sweden. Pp. 1-132.
- Holweg, J., Miemczyk, J. (2003). *Delivering the '3-day car' – the strategic implications for automotive logistics operations*. Journal of Purchasing and Supply Management, Volume 9, Issue 2, pp. 63-71.
- Hong, G.P., Kim K.H. (2006). *A heuristic rule for relocating blocks*. Computers & Operations Research, Volume 33, pp. 940-954.
- Iranpour, R., Tung, D. (1989). *Methodology for optimal design of a parking lot*. Journal of Transportation Engineering, Volume 115 (2), pp. 139-160.
- Jiménez-Martín, S. (2010). *Econometría III: Modelos de duración*. CENIT, UPC.
- Kiefer, N. (1988). *Economic duration data and hazard functions*. J. Econ. Lit. 26(2), pp. 646-679.
- Kim, K.H., Lee, K.M., Hwang, H. (2003). *Sequencing delivery and receiving operations for yard cranes in port container terminals*. International Journal of Production Economics, Volume 84, pp. 283-292.
- Kim, K.H., Kim, H.B. (2002). *The optimal sizing of the storage space and handling facilities for import containers*. Transportation Research B, B36, pp. 821-835.



- Kim, K.H., Park, Y.M., Ryu, K.R. (2000). *Deriving decision rules to locate export containers in container yards*. European Journal of Operational Research, Volume 124, pp. 89-101.
- Martín, E. (2008). *Optimización de la operativa del subsistema de recepción y entrega en terminales portuarias de contenedores*. Tesina de especialidad ETSECCPB – UPC, 2008.
- Mattfeld, D. (2006). *The management of transshipment terminals*. Springer, Berlin Heidelberg, New York.
- Mattfeld, D., Kopfer, H. (2003). *Terminal operations management in vehicle transshipment*. Transportation Research A, 37A, pp. 435-452.
- Mattfeld, D., Orth, H. (2006). *The allocation of storage space for transshipment in vehicle distribution*. OR Spectrum, Volume 28, pp. 681-703.
- Preston, P., Kozan, E. (2001). *An approach to determine storage locations of containers at seaport terminals*. Computers & Operations Research, Volume 28, pp. 983-995.
- Saurí, S. (2002). *Operaciones y colas de los barcos en los puertos*. Tesina de especialidad ETSECCPB – UPC, 2002.
- Taleb-Ibrahimi, M. (1989). *Modeling and analysis of container handling in ports*. Ph.D.Thesis, Department of Industrial Engineering and Operations Research, University of California, Berkeley, CA, USA.
- Yang, J.H., Kim, K.H. (2006). *A grouped storage method for minimizing relocations in block stacking systems*. Journal of Intelligent Manufacturing, Volume 17, Number 4, pp. 453-463.

---

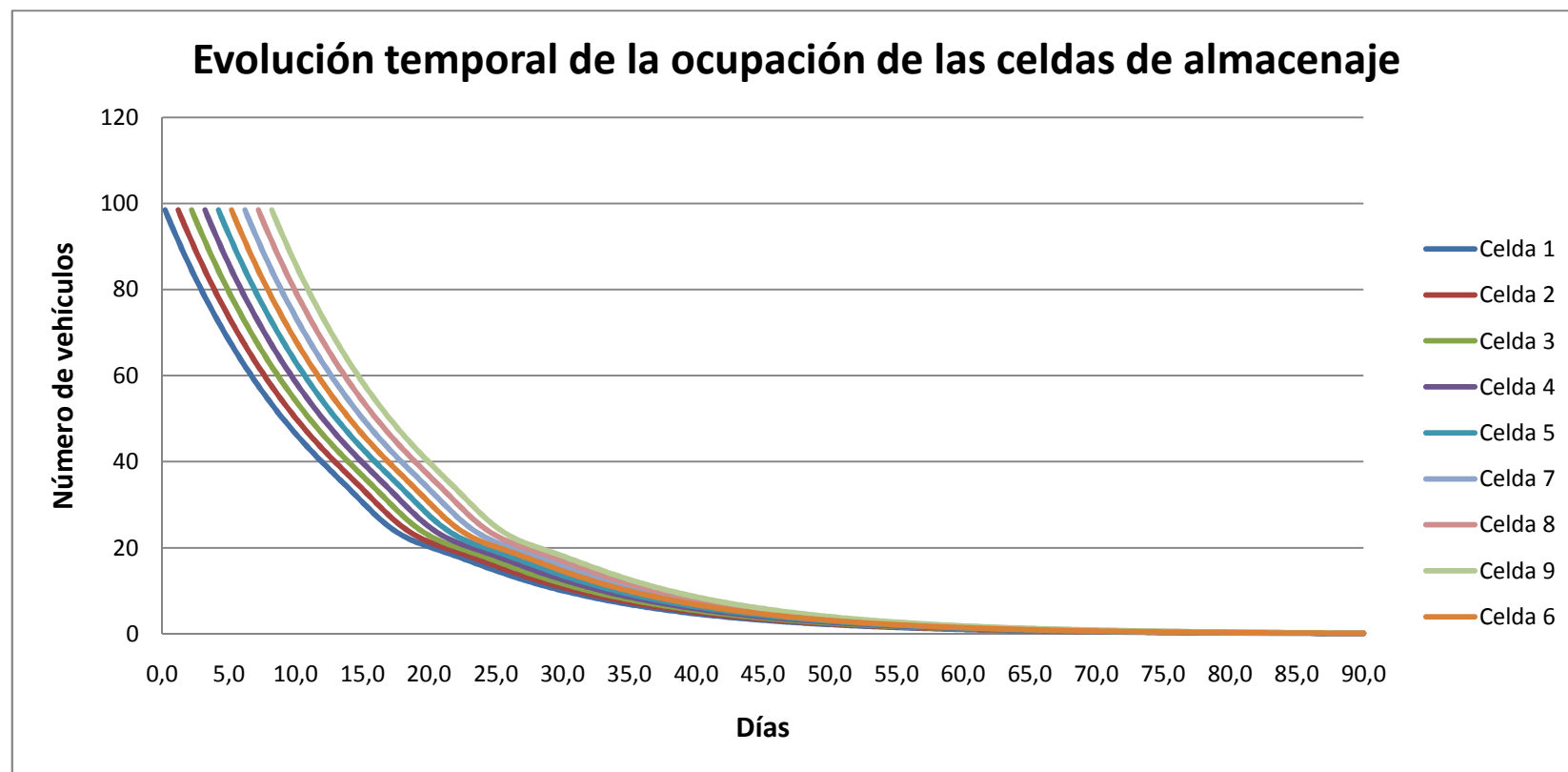
## **ANEJOS**

## ANEJO I: SIMULACIONES DE LA MODELIZACIÓN DE LOS RITMOS OPERACIONALES

### SIMULACIÓN 1

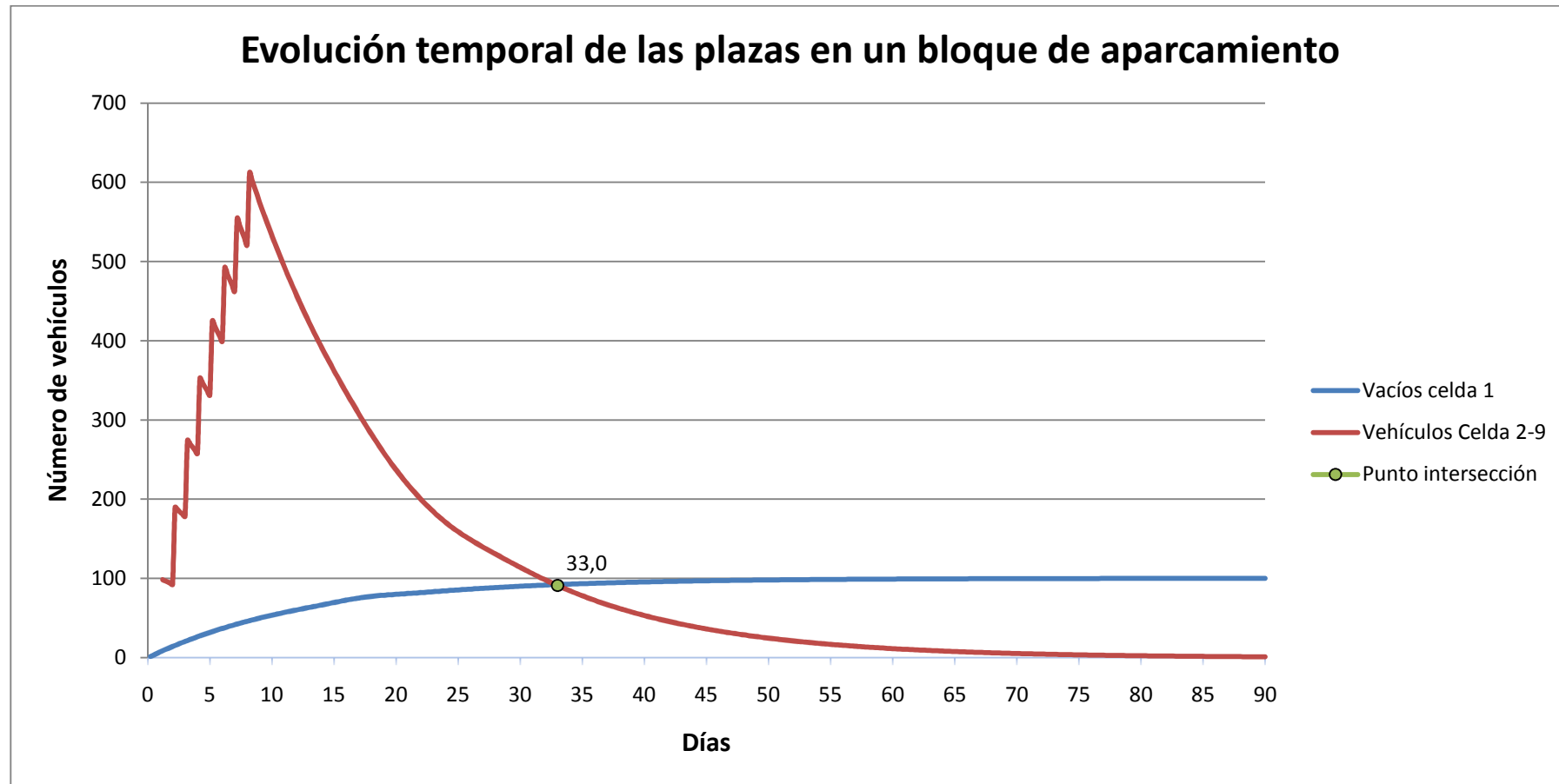
Ritmo de llegadas de vehículos medio:  $\lambda = 1$  grupo de vehículos/día = 100 veh/día

Ritmo de salidas de vehículos medio:  $\mu = 3$  veh/día·celda





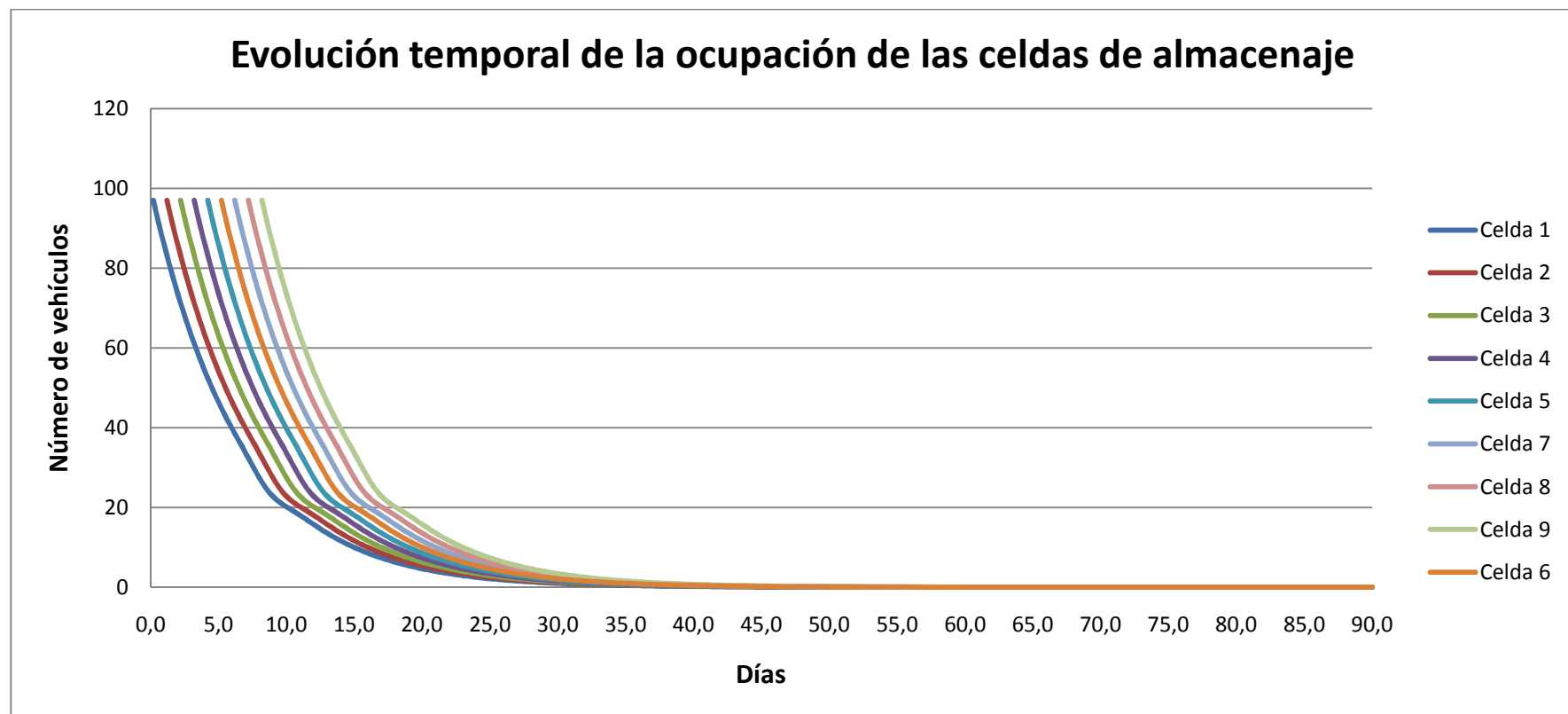
## SIMULACIÓN 1



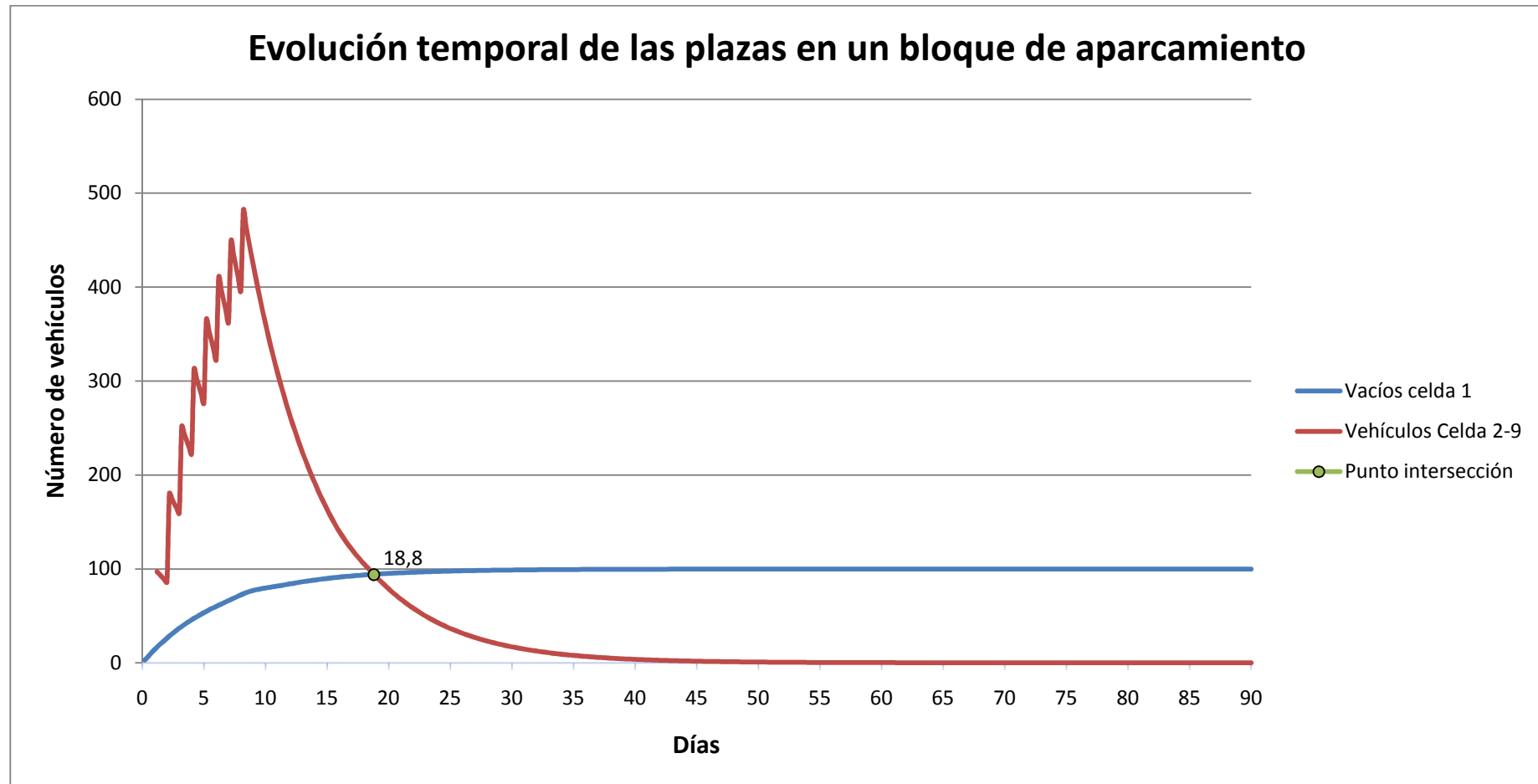
## SIMULACIÓN 2

Ritmo de llegadas de vehículos medio:  $\lambda = 1$  grupo de vehículos/día = 100 veh/día

Ritmo de salidas de vehículos alto:  $\mu = 6$  veh/día·celda



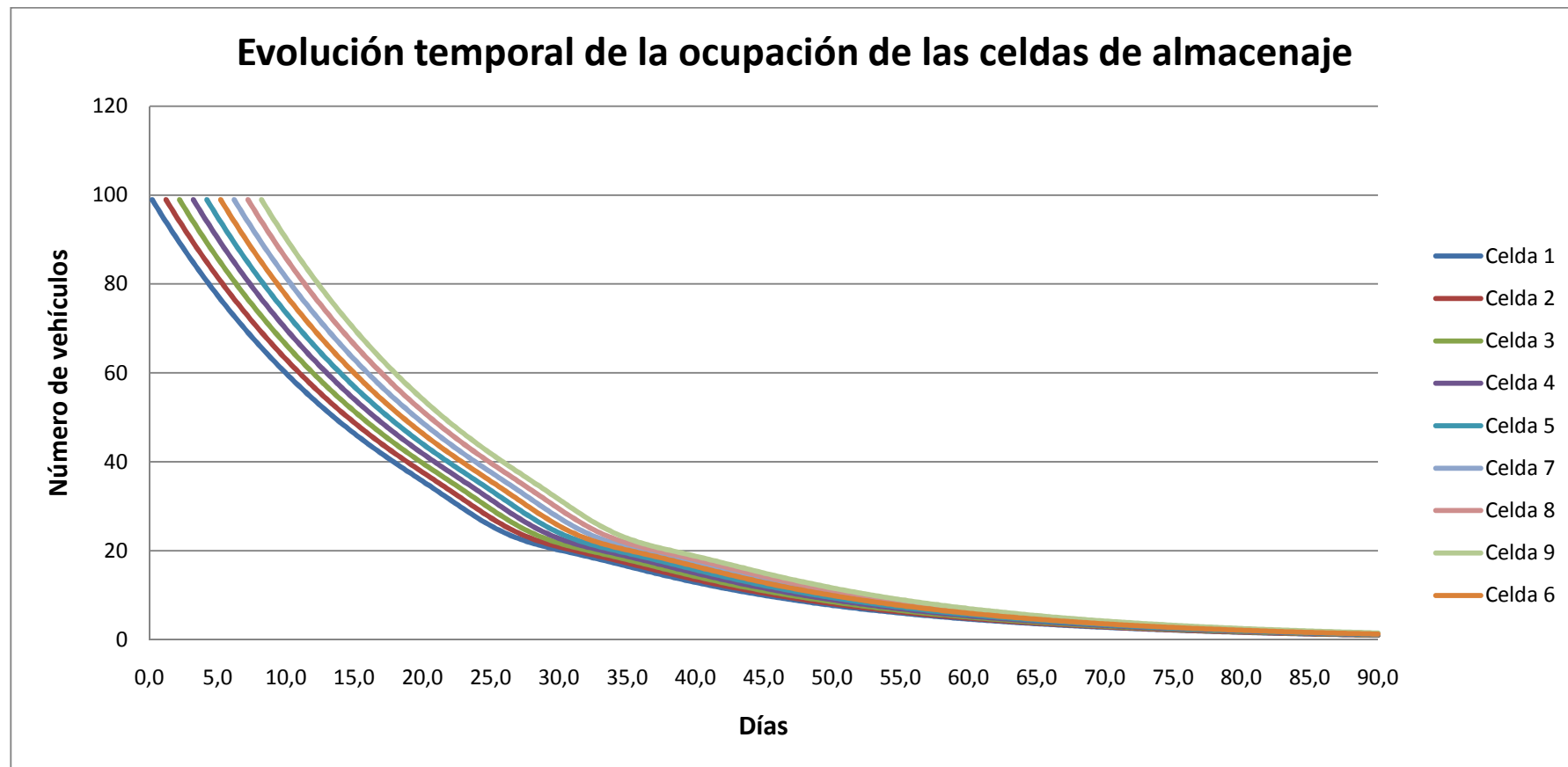
## SIMULACIÓN 2



### SIMULACIÓN 3

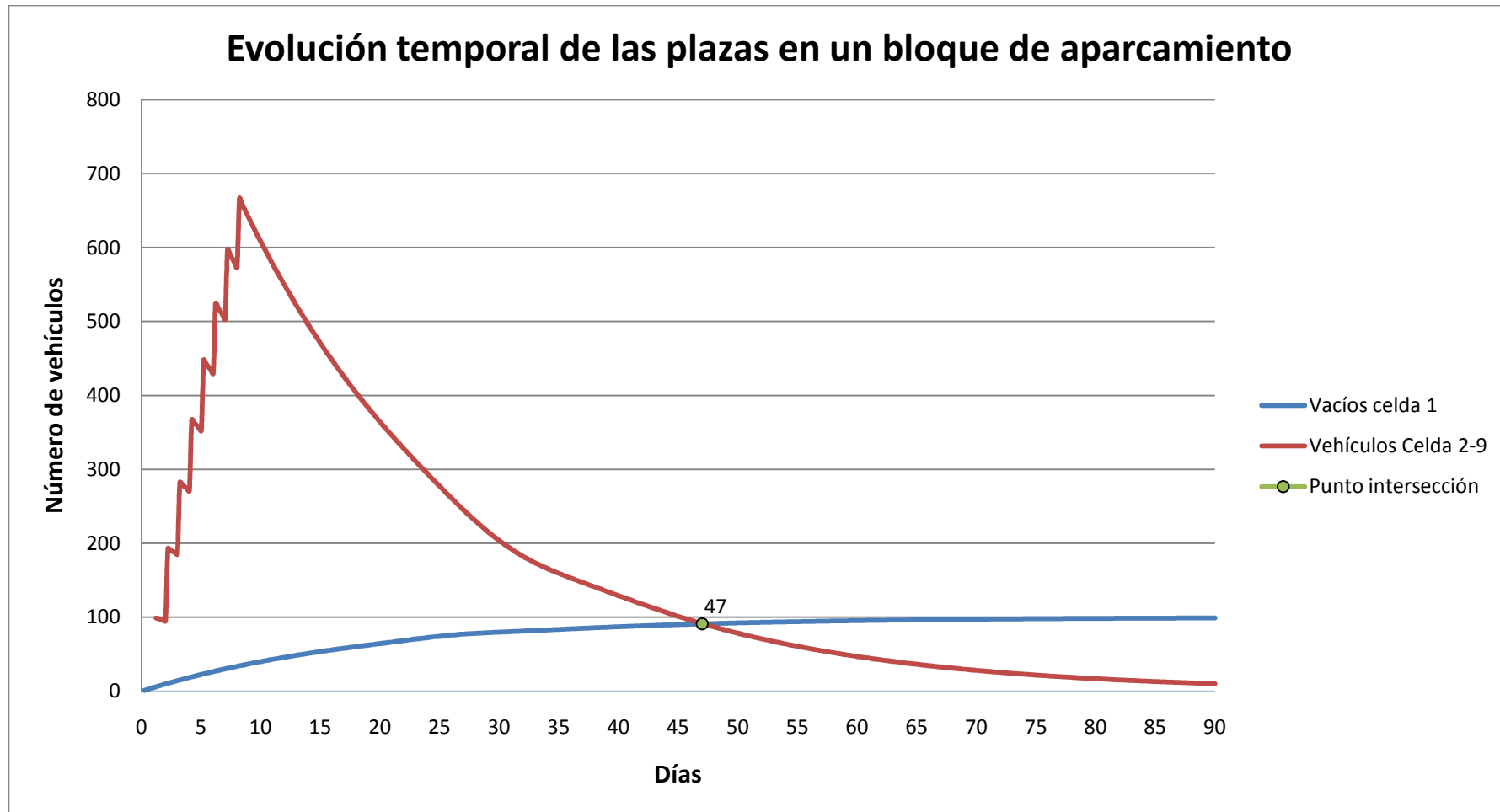
Ritmo de llegadas de vehículos medio:  $\lambda = 1$  grupo de vehículos/día = 100 veh/día

Ritmo de salidas de vehículos bajo:  $\mu = 2$  veh/día·celda





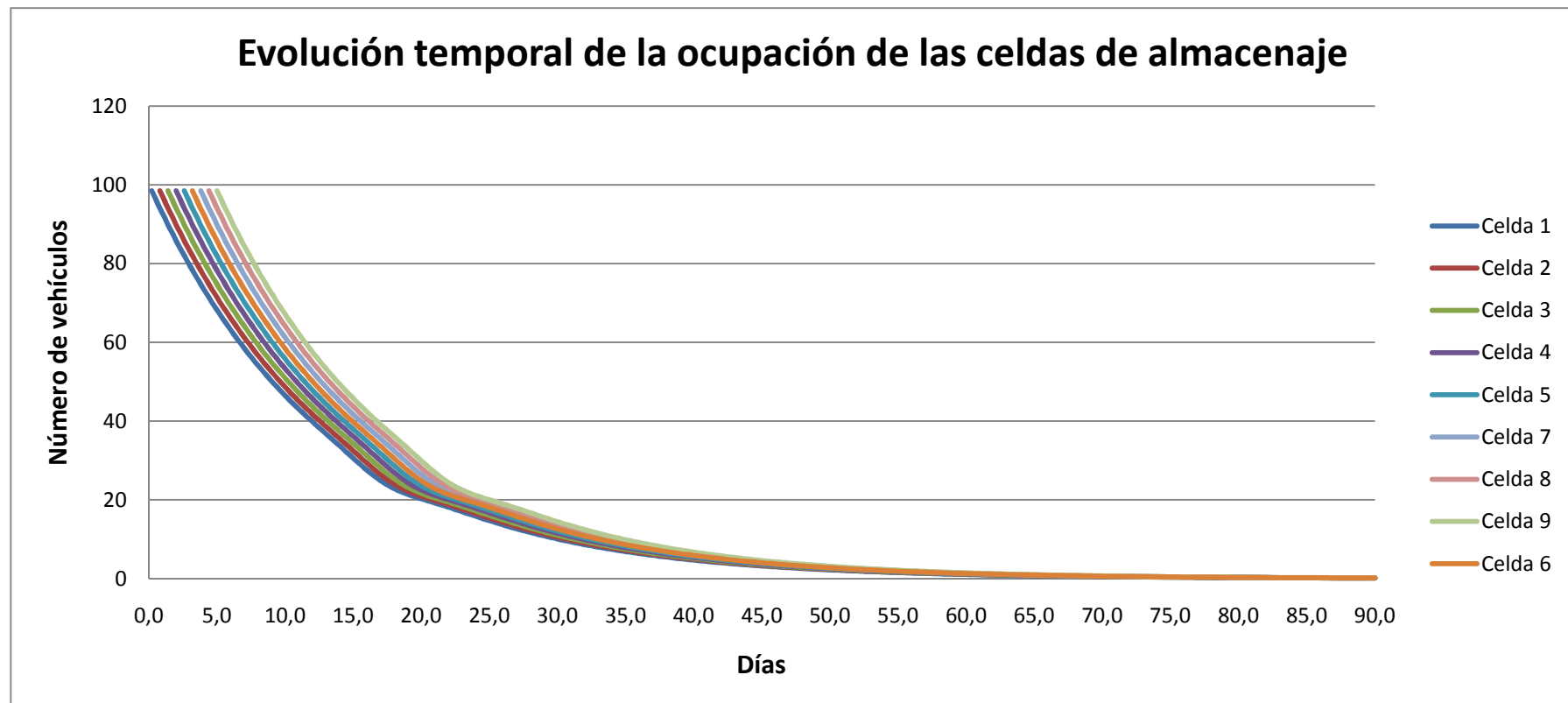
### SIMULACIÓN 3



## SIMULACIÓN 4

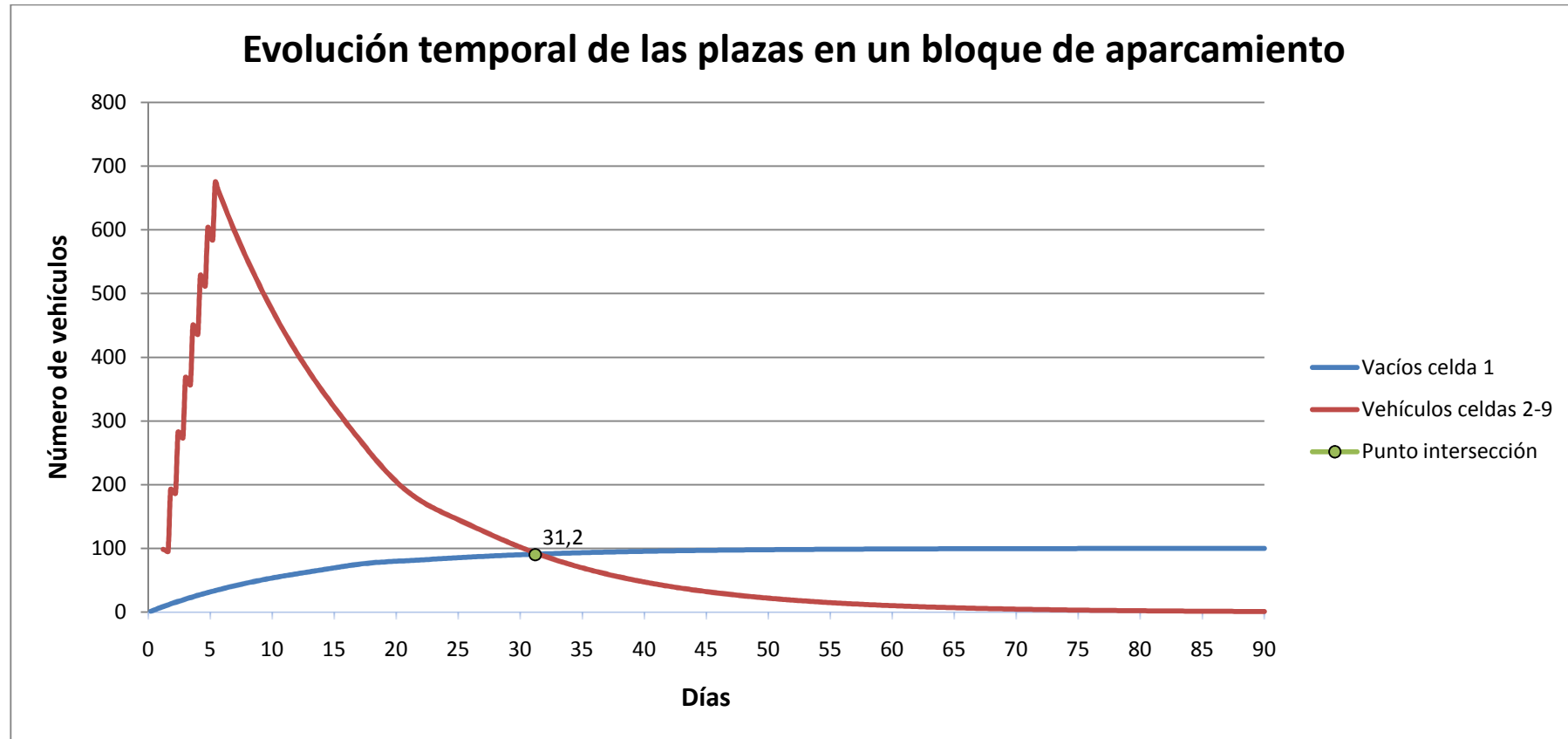
Ritmo de llegadas de vehículos alto:  $\lambda = 1,67$  grupos de vehículos/día = 167 veh/día

Ritmo de salidas de vehículos medio:  $\mu = 3$  veh/día·celda





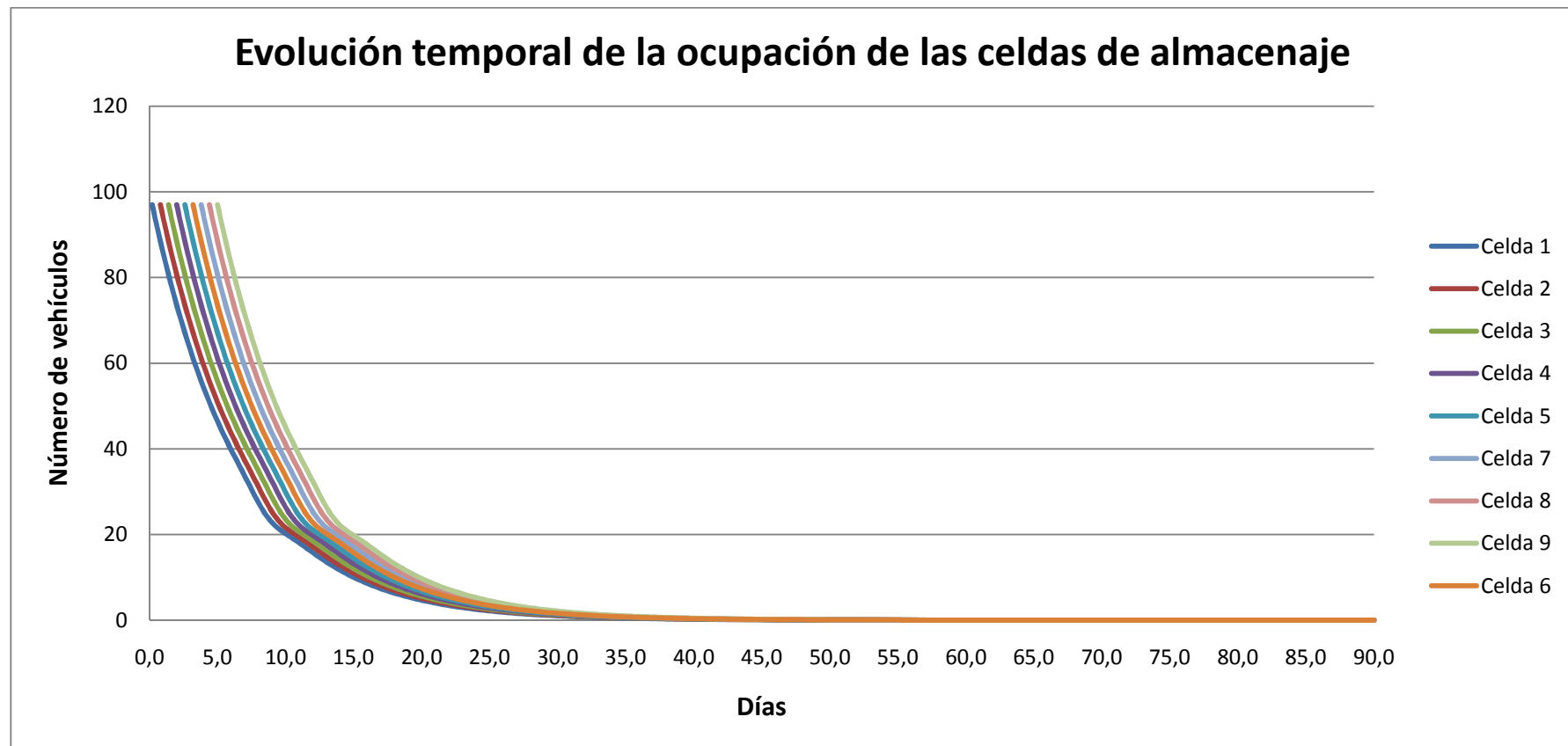
## SIMULACIÓN 4



## SIMULACIÓN 5

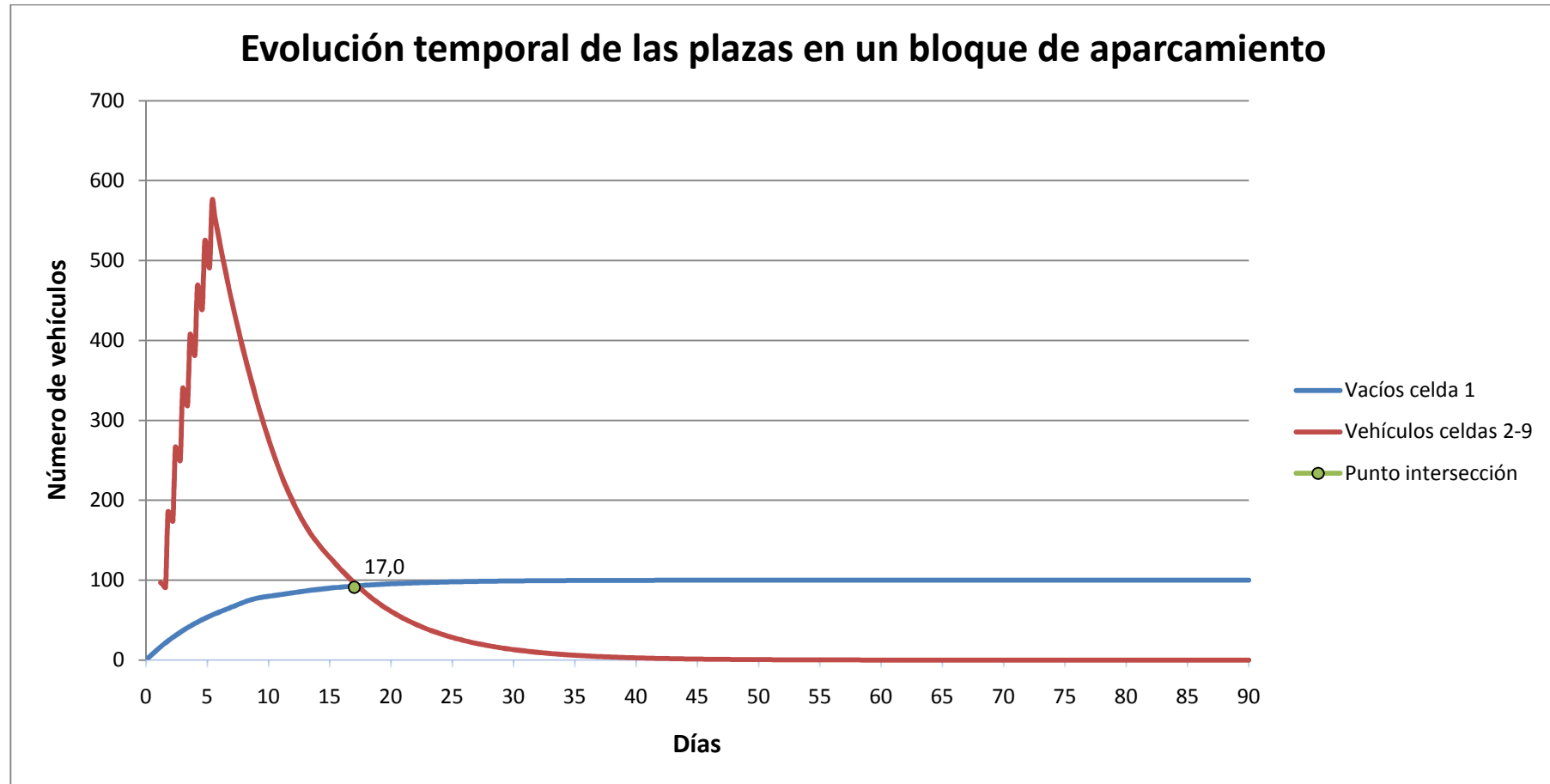
Ritmo de llegadas de vehículos alto:  $\lambda = 1,67$  grupos de vehículos/día = 167 veh/día

Ritmo de salidas de vehículos alto:  $\mu = 6$  veh/día·celda





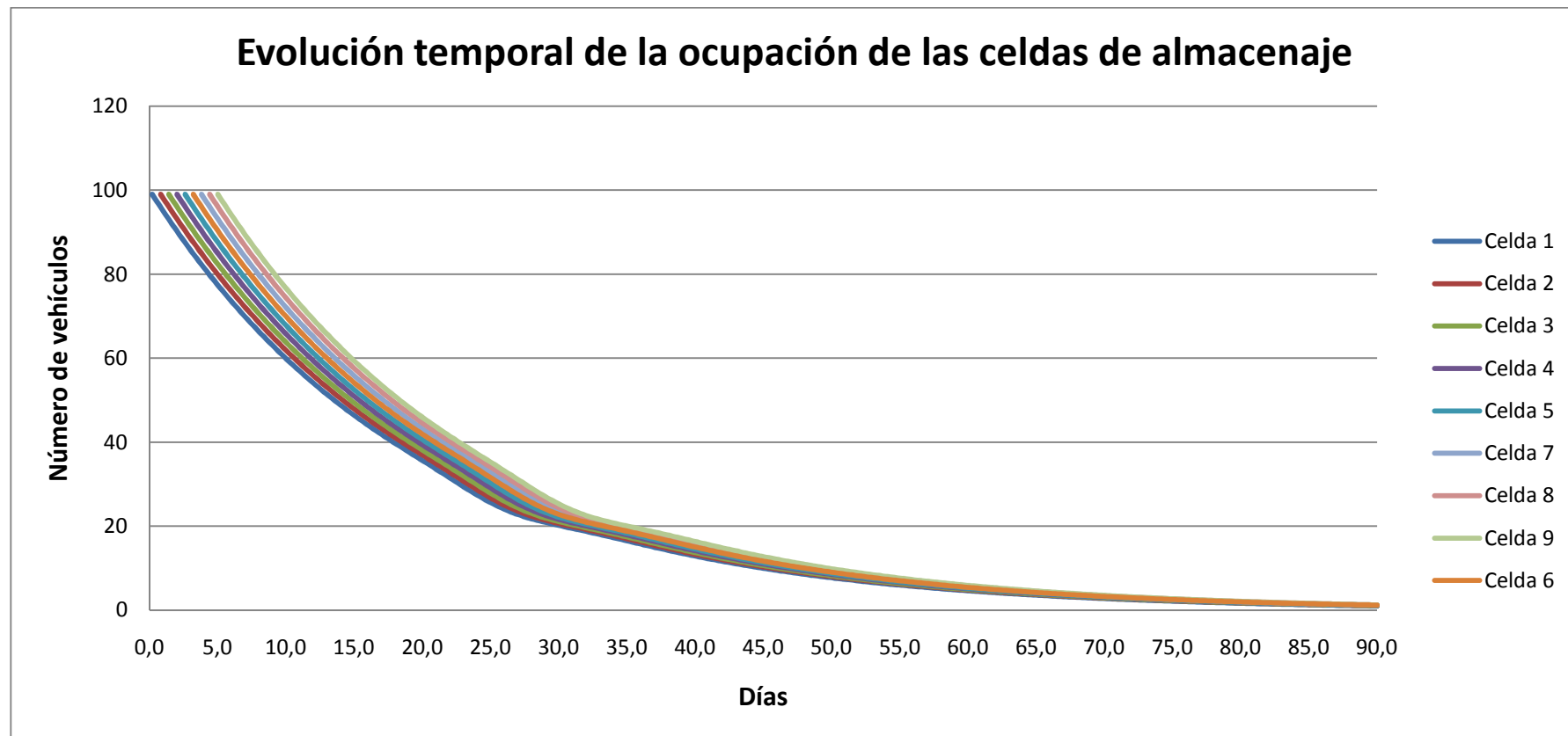
## SIMULACIÓN 5



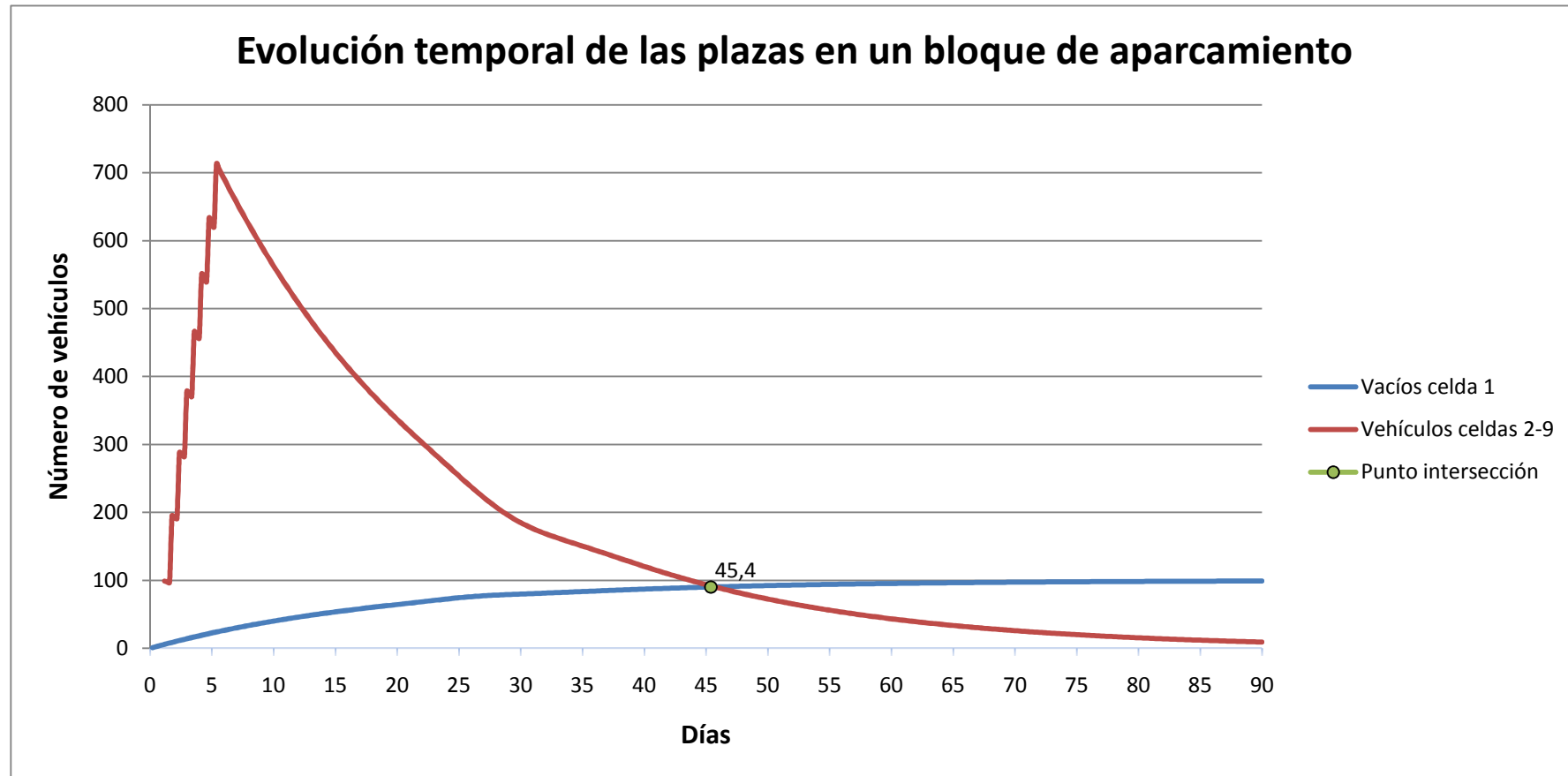
## SIMULACIÓN 6

Ritmo de llegadas de vehículos alto:  $\lambda = 1,67$  grupos de vehículos/día = 167 veh/día

Ritmo de salidas de vehículos bajo:  $\mu = 2$  veh/día-celda



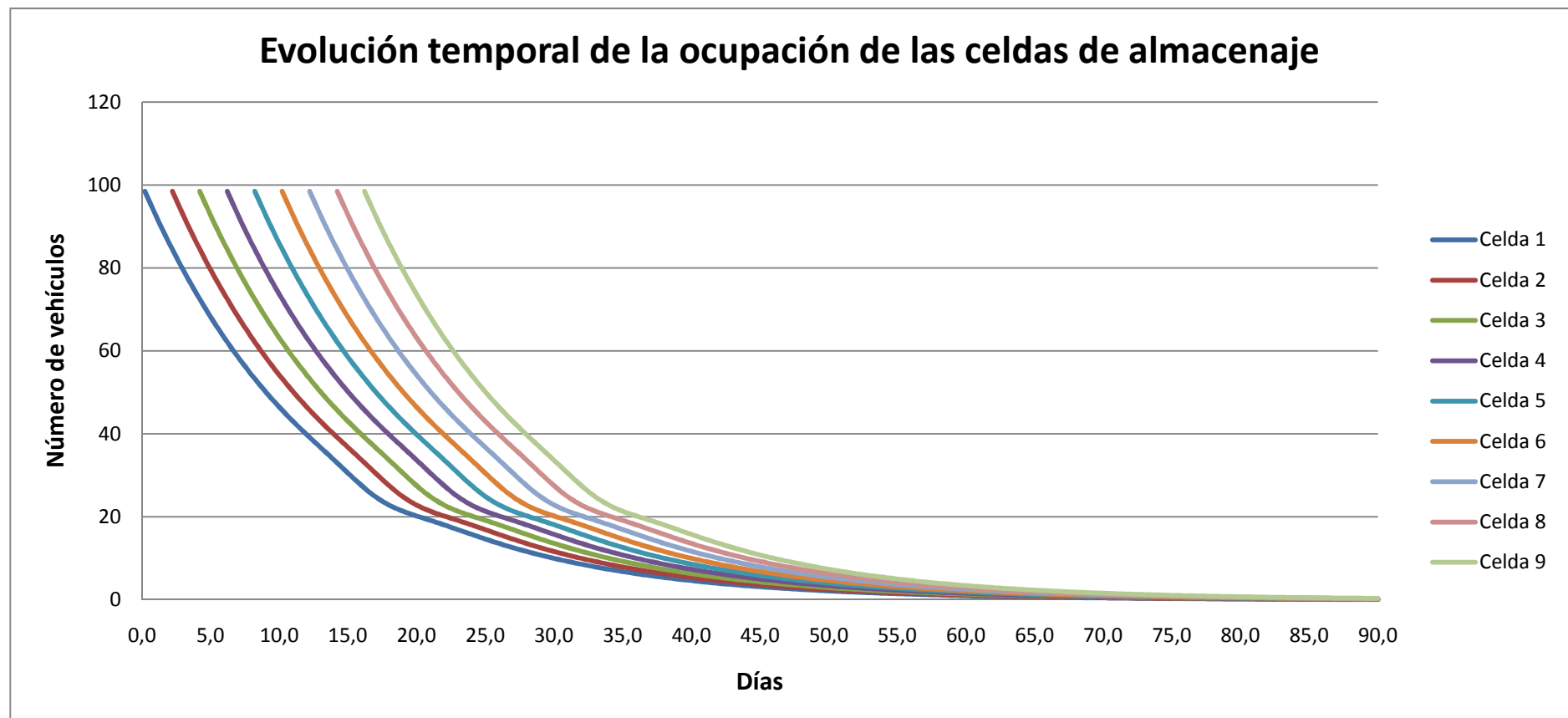
## SIMULACIÓN 6



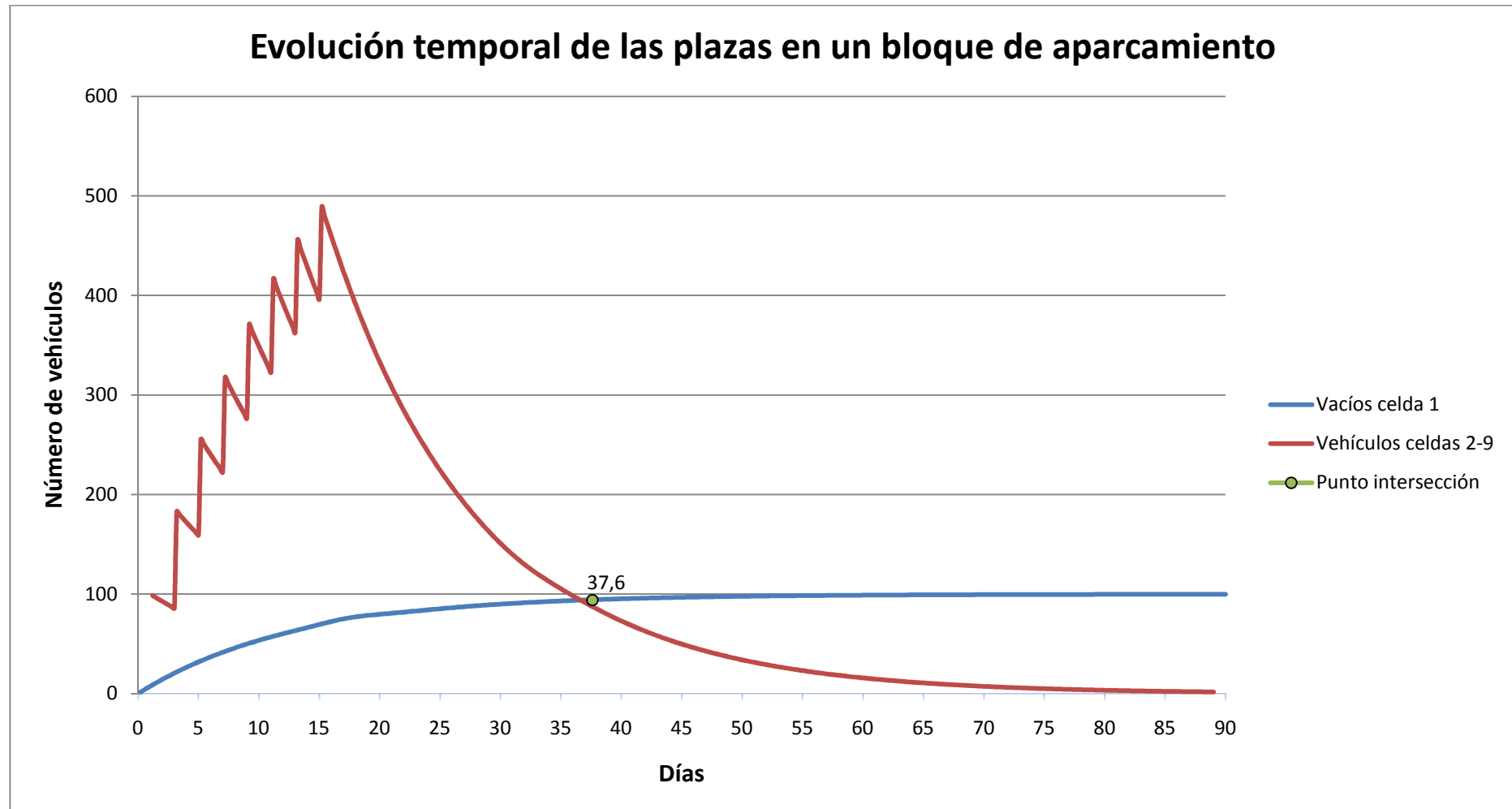
**SIMULACIÓN 7**

Ritmo de llegadas de vehículos bajo:  $\lambda = 0,5$  grupos de vehículos/día = 50 veh/día

Ritmo de salidas de vehículos medio:  $\mu = 3$  veh/día·celda



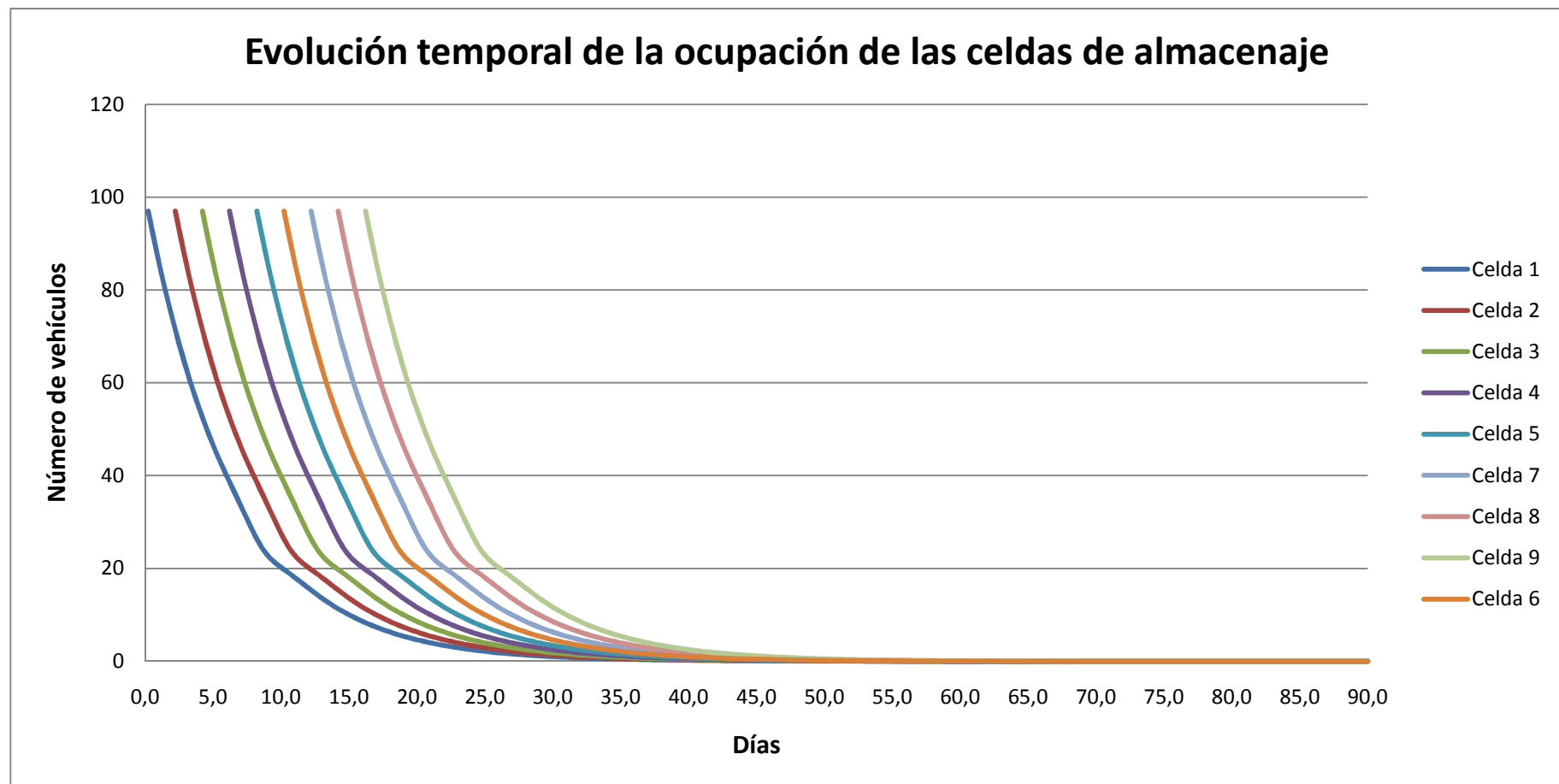
## SIMULACIÓN 7



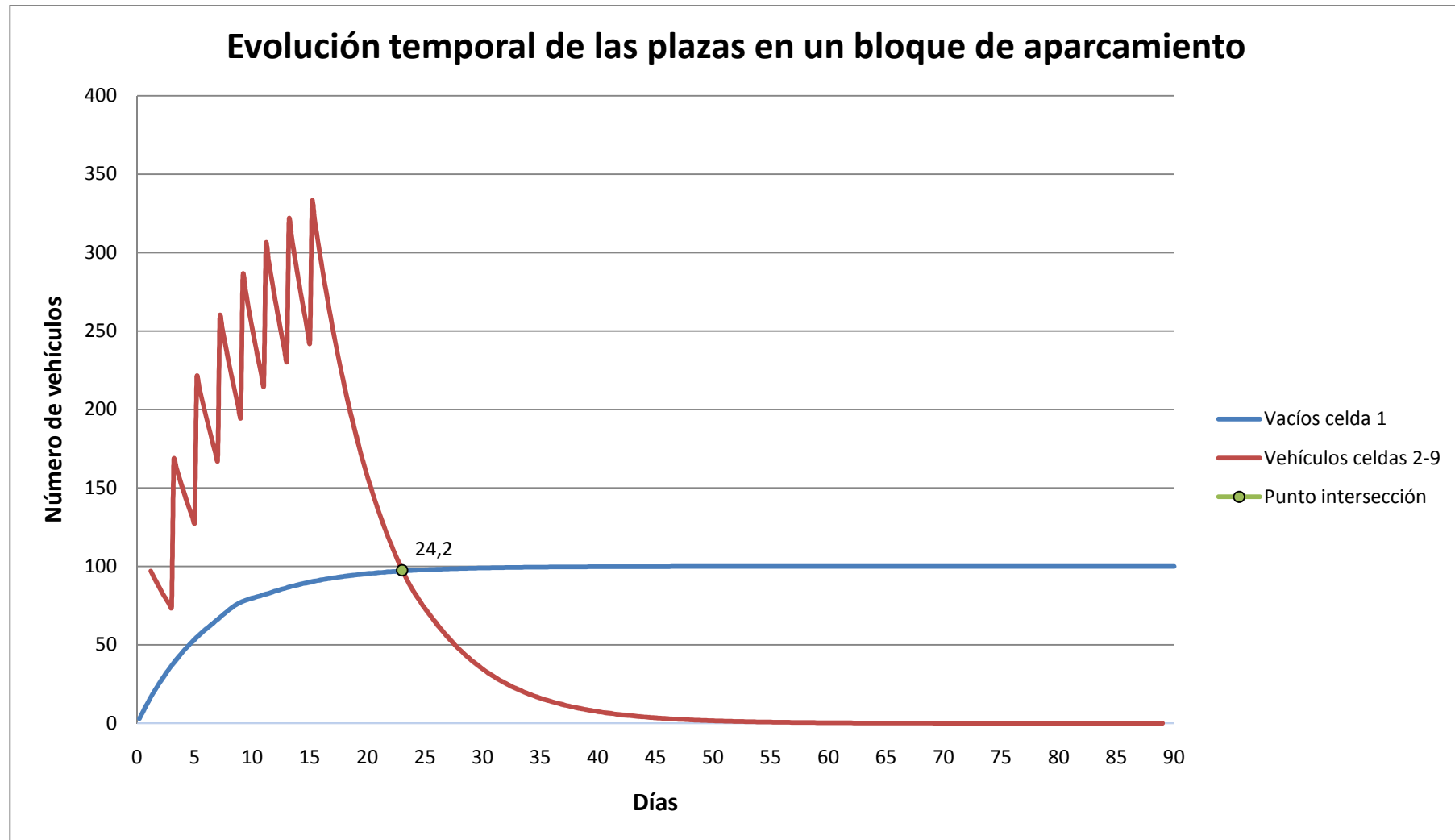
**SIMULACIÓN 8**

Ritmo de llegadas de vehículos bajo:  $\lambda = 0,5$  grupos de vehículos/día = 50 veh/día

Ritmo de salidas de vehículos alto:  $\mu = 6$  veh/día·celda



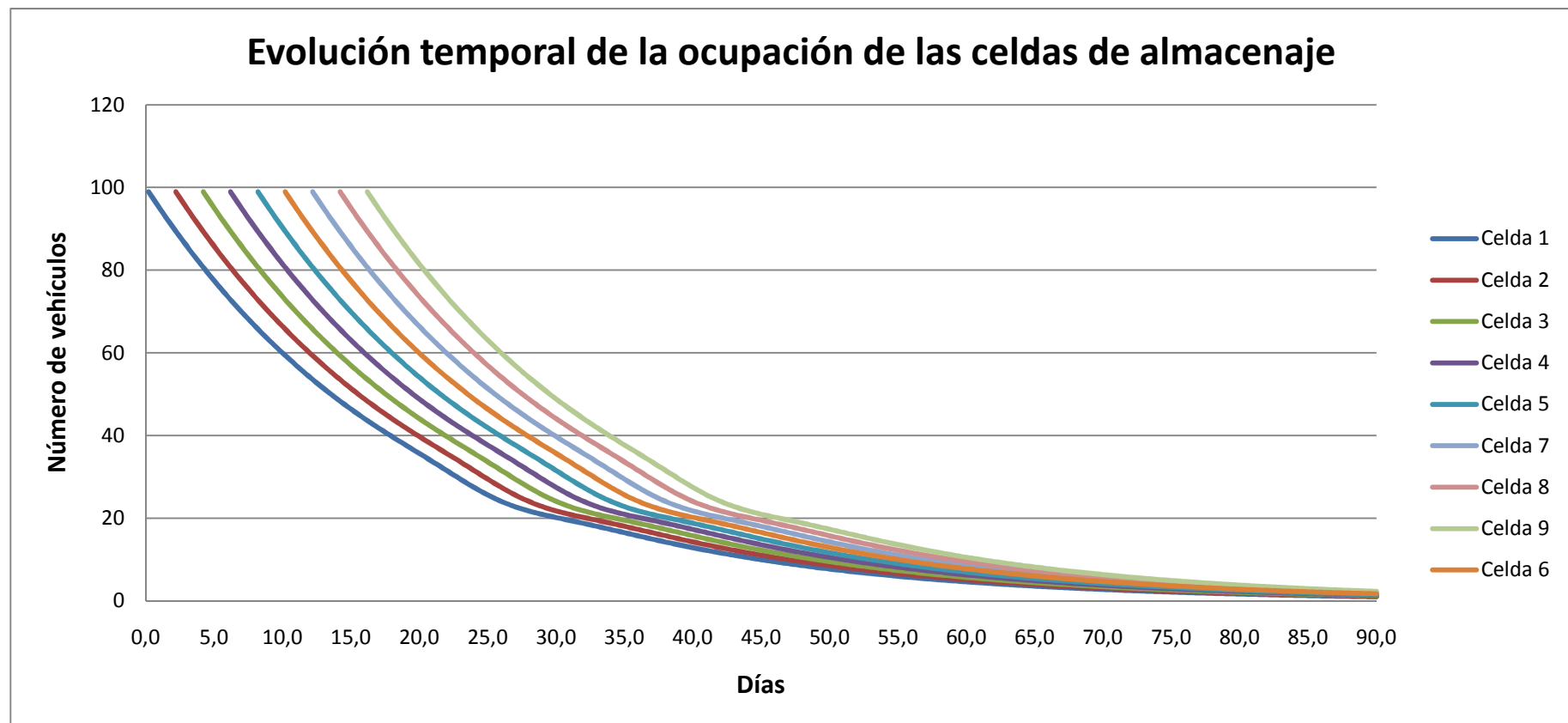
## SIMULACIÓN 8



**SIMULACIÓN 9**

Ritmo de llegadas de vehículos bajo:  $\lambda = 0,5$  grupos de vehículos/día = 50 veh/día

Ritmo de salidas de vehículos bajo:  $\mu = 2$  veh/día·celda





## SIMULACIÓN 9

